HAL
open science

La fissuration due au retrait restreint dans les réparations minces en béton: apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation

Olivier Laurence

To cite this version:

Olivier Laurence. La fissuration due au retrait restreint dans les réparations minces en béton: apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation. Engineering Sciences [physics]. Ecole des Ponts ParisTech, 2001. English. NNT : . pastel-00000639

HAL Id: pastel-00000639

https://pastel.hal.science/pastel-00000639

Submitted on 2 Apr 2004

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées

Spécialité : Structures et Matériaux

Philosophiae Doctor (Ph.D.) de l'Université Laval

Spécialité : Génie civil

Thèse présentée par :

Olivier LAURENCE

pour l'obtention du titre de docteur de l'École Nationale des Ponts et Chaussées
et du titre de Philosophiae Doctor (Ph.D.) de l'Université Laval

LA FISSURATION DUE AU RETRAIT RESTREINT DANS LES RÉPARATIONS MINCES EN BÉTON : APPORTS COMBINÉS DE L'EXPÉRIMENTATION ET DE LA MODÉLISATION

Soutenue le 29 Août 2001 devant le jury composé de :

D. BEAUPRÉ	Rapporteur
J.-L. GRANJU	Rapporteur
P. ACKER	Examinateur
B. BISSONNETTE	Examinateur
M. PIGEON	Directeur de thèse
P. ROSSI	Directeur de thèse

ABSTRACT

This doctoral thesis deals with the cracking of thin concrete repairs due to hygrothermal loading. The purpose of this research work is the study of the cracking process and mechanisms, specially at the interface between old and new concrete. The methodology is based on two complementary approaches. The first one is an experimental study of in situ behavior of concrete repairs under the action of wetting-drying cycles. The second one is a numerical modeling of cracking due to drying in thin concrete repairs. The results show that drying and resulting cracking are not baneful to bonding and that the mechanical behavior of repaired elements is monolithic. Indeed, the cracks which reach interface are braked or propagate into the substrate, but they never cause debonding of the repair layer. Taken as a whole, results show that adhering thin concrete repairs have a very good behavior under drying and that, in appropriate conditions of casting and with quality materials, they are in many cases a viable rehabilitation alternative.

Olivier Laurence	Pierre Rossi	Michel Pigeon

RÉSUMÉ COURT

Ce travail porte sur la fissuration des réparations minces en béton soumises à un chargement hygrothermique et a pour objectif l'étude du processus et des mécanismes de propagation des fissures, notamment à l'interface. La méthodologie repose sur deux approches principales. La première consiste en une étude expérimentale du comportement in situ des réparations en béton soumises à des cycles de mouillage-séchage. La seconde est une étude par modélisation numérique de la fissuration due au séchage dans les réparations minces en béton. Les résultats montrent que le séchage seul et la fissuration qui en découle ne sont pas préjudiciables à l'adhérence et que le comportement des éléments réparés est monolithique. En effet, les fissures qui atteignent l'interface sont freinées ou se propagent dans le support, mais elles ne provoquent pas le décollement de la couche de réparation. Globalement, les résultats obtenus démontrent que les réparations minces adhérentes en béton se comportent très bien au séchage et que, dans des conditions de mise en œuvre adéquates et avec des matériaux de qualité, elles constituent donc une alternative de réhabilitation tout à fait viable dans plusieurs situations.

Olivier Laurence | Pierre Rossi | Michel Pigeon

RÉSUMÉ LONG

Ce travail de recherche porte sur la fissuration due au retrait restreint dans les réparations minces en béton soumises à un chargement hygrothermique. L'objectif était de mieux comprendre le processus de fissuration, d'identifier les paramètres qui la gouvernent et d'étudier les mécanismes de propagation des fissures lorsqu'elles atteignent l'interface avec le support.

La méthodologie repose sur deux approches principales. La première consiste en une étude expérimentale, sur des corps d'épreuve de taille représentative, du comportement in situ des réparations en béton soumises à des cycles de mouillage-séchage. L'étude s'intéresse en particuliers au comportement hygrométrique, à la durabilité de l'adhérence et à la fissuration des réparations. Les variables de l'étude sont l'épaisseur de réparation et la nature du matériau de réparation. Trois épaisseurs ont été retenues: 25 mm, 50 mm et 75 mm. Les matériaux choisis couvrent l'ensemble du spectre en ce qui a trait au retrait ultime des matériaux de réparation. La seconde est une étude par modélisation numérique, à l'aide d'un modèle probabiliste de fissuration discrète, de la fissuration due au séchage dans les réparations minces en béton. Les variables principales de l'étude numérique sont les mêmes que celles de l'étude expérimentale.

L'étude expérimentale et les simulations ont montré que la fissuration des réparations soumises au séchage est inévitable et se développe rapidement en profondeur. Après 1 an, pour l'ensemble des conditions étudiées, les fissures atteignent l'interface avec le support. Elles ne s'y sont propagées que dans le cas des réparations les plus minces, soit celles de 25 mm. L'importance de la fissuration est fonction de l'épaisseur de la réparation et de la nature du matériau de réparation, notamment de sa diffusivité et de sa quantité d'eau libre. En outre, aucune fissure orientée le long de l'interface n'a été observée ni prédite par calcul. Ces résultats indiquent que le comportement mécanique des éléments réparés soumis au séchage est monolithique et que le séchage seul ne peut provoquer le décollement de la réparation. De plus, les résultats des essais d'adhérence par traction directe confirment qu'après 2 ans d'exposition, le séchage et la fissuration n'ont pas conduit à la détérioration de l'adhésion entre les réparations et leur support.

Globalement, les résultats obtenus démontrent que, dans des conditions de mise en œuvre adéquates et avec des matériaux de qualité, les réparations minces adhérentes en béton se comportent bien face à des sollicitations environnementales cycliques de nature hygrométrique et thermique. Ce type d'intervention constitue donc une alternative de réhabilitation tout à fait viable dans plusieurs situations.

Olivier Laurence | Pierre Rossi | Michel Pigeon

AVANT PROPOS

Ce travail de doctorat a été réalisé au sein de deux laboratoires de recherche, le C.R.I.B. - Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Béton de l'Université Laval à Québec et le L.C.P.C. - Laboratoire Central des Ponts et Chaussées à Paris.

Je souhaite donc tout d'abord remercier sincèrement mes deux directeurs de thèse, Michel Pigeon, professeur à l'Université Laval et directeur du C.R.I.B. et Pierre Rossi, directeur de recherche et chef de la division Béton et Composites Cimentaires du L.C.P.C., pour m'avoir accueilli au sein de ces deux équipes de recherche et pour m'avoir permis de réaliser ce doctorat dans de bonnes conditions. Ils ont su me guider et me conseiller aux moments importants dans les orientations prises pour mener à bien ce travail.

Je voudrais également remercier les membres de mon jury de thèse, Messieurs P. Acker, D. Beaupré, B. Bissonnette et J.-L Granju pour l'attention qu'ils ont bien voulu porter à cette thèse.

Je désire également remercier vivement Monsieur Benoît Bissonnette, attaché de recherche au Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Béton pour son soutien quotidien tout au long de ce travail de doctorat et pour son amitié qui ont permis que cette aventure prenne forme et se concrétise.

Je voudrais remercier chaleureusement les membres du C.R.I.B. et ceux de la division Béton et Composites Cimentaires du L.C.P.C. pour leur aide, leur amitié et leur soutien moral tout au long de ce travail. Au C.R.I.B., mes remerciements s'adressent tout spécialement à David Boily, à Marcel Langlois et à Luc Boisvert pour leur aide et leur amitié, ainsi qu'à Denis Lagacé pour sa participation technique au projet. Je remercie également Fabien Perez, Laurent Molez et Daniel

Boulet pour les longues discussions que nous avons eu sur le béton et les réparations en béton qui m'ont permis d'avancer dans ma réflexion. Au L.C.P.C., mes remerciements s'adressent tout particulièrement à Ramzi Ben Romdhane, Jean Luc Clément et Jean Louis Tailhan pour leur aide dans l'utilisation du code de calcul CESAR-LCPC et aussi pour leur amitié. Je n'oublierai pas également de remercier Marie Patané, Claude Boulay, Pierre Gelade, Fabrice Le Maou et Robert Le Roy pour leur amitié et leur soutien moral.

Enfin, je tiens à souligner que ce projet a été supporté financièrement par le CRSNG - Conseil de Recherche en Sciences Naturelles et en Génie du Canada, les fonds FCAR du Québec (Fonds pour la formation de Chercheurs et l'Aide à la Recherche), la Chaire Industrielle de l'Université Laval sur le Béton Projeté et les Réparations en Béton (Béton Mobile du Québec, Ville de Montréal, Ville de Québec, Hydro Québec, Matériaux King, Lafarge Canada, Master Builders, Ministère des Transports du Québec, Rhodia, Ciment Saint-Laurent et W.R. Grace & Co.) et également par d'autres partenaires industriels (Euclid, Sika, Soconex). Je les remercie pour leur soutien technique et financier et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce projet de recherche.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé court i
Résumé long ii
Avant-propos iii
Table des matières v

Introduction générale 1

PARTIE I: ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE, CONTEXTE, OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE

Chapitre 1 - Les phénomènes agissant sur le comportement des réparations sous chargement hydrique 5
1.1 Hydratation et retrait endogène 5
1.1.1 L'hydratation et ses conséquences physiques 5
1.1.2 Conséquences mécaniques de l'hydratation et du retrait endogène 6
1.2 Séchage et retrait de séchage 7
1.2.1 Transport de l'eau dans les matériaux cimentaires 7
1.2.2 Mécanismes du retrait de séchage 8
1.2.3 La fissuration due au retrait de séchage 9
1.2.3.1 Mécanismes d'initiation et processus de propagation 9
1.2.3.2 Effet de la rigidité de la structure sur la fissuration 11
1.2.3.3 Influence de la teneur en eau évaporable du matériau sur la fissuration 11
1.3 Comportement viscoélastique des matériaux cimentaires 13
1.3.1 Mécanismes physiques à l'origine du fluage propre 14
1.3.2 Théorie de la microfissuration 17
1.3.3 Fluage de dessiccation 18
1.4 Chronologie, cinétique et interdépendance de ces phénomènes 19
1.4.1 Chronologie 19
1.4.2 Cinétique 20
1.4.3 Interdépendance 22

Chapitre 2 - Compatibilité déformationnelle et capacité d'adaptation des matériaux de réparation 25
2.1 Le concept de compatibilité 25
2.1.1 Compatibilité déformationnelle 25
2.1.2 Les méthodes d'obtention de la compatibilité déformationnelle 27
2.2 Le concept de capacité d'adaptation 28
2.2.1 Capacité d'adaptation en situation de retrait endogène empêché 31
2.2.2 Capacité d'adaptation en situation de retrait de séchage empêché 35

Chapitre 3 - Indicateurs de durabilité d'une réparation en béton 37
3.1 Définition d'une réparation durable 37
3.2 Adhérence au support 38
3.2.1 Mécanismes d'adhésion au support 38
3.2.1.1 Théorie du blocage mécanique 38
3.2.1.2 Théorie de l'adsorption 39
3.2.2 Existence d'une interface et microstructure de la zone interfaciale 42
3.2.3 Adhérence développée entre la réparation et son support 43
3.2.3.1 Technique de préparation de surface 43
3.2.3.2 Utilisation d'un agent de liaison 45

3.2.3.3 État hydrique du support 46
3.3 Fissuration et endommagement des réparations 47
3.3.1 Pertes d'adhérence et décollement 48
3.3.2 Fissuration du matériau de réparation 49
3.3.2.1 Profondeur de fissuration et incidence du fluage 50
3.3.2.2 Mécanismes de décollement et de propagation à l'interface 51

Chapitre 4 - Objectifs et méthodologie du projet de recherche 55
4.1 Contexte général du projet 55
4.2 Objectifs 57
4.3 Méthodologie 58
4.3.1 Étude in situ du comportement des réparations minces en béton sous chargement hygrothermique 58
4.3.1.1 Confection des supports en béton armé 58
4.3.1.2 Procédure de réparation 59
4.3.1.3 Paramètres de l'étude in situ 62
4.3.1.4 Programme expérimental 65
4.3.2 Étude de la capacité d'adaptation par fluage des matériaux de réparation 76
4.3.3 Étude numérique de la fissuration due au retrait restreint dans les réparations minces en béton 77

PARTIE II: CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX DE RÉPARATION ET ÉTUDE EXPÉRIMENTALE IN SITU DU COMPORTEMENT HYGROMÉTRIQUE DES RÉPARATIONS

Chapitre 5 - Caractérisation des propriétés des matériaux de réparation utilisés in situ 80
5.1 Propriétés mécaniques 81
5.1.1 Résistance en compression 81
5.1.2 Résistance en traction par fendage 83
5.1.3 Module d'élasticité 85
5.1.4 Contrôle de la fissuration par le mortier fibré 87
5.2 Propriétés hygrométriques 89
5.2.1 Retrait endogène 89
5.2.2 Retrait avec séchage et perte de masse due au séchage 91
5.3 Capacité d'adaptation par fluage des matériaux de réparation 93
5.4 Conclusions 99

Chapitre 6 - Comportement hygrométrique des réparations 100
6.1 Conditions climatiques extérieures 100
6.1.1 Température 101
6.1.2 Humidité relative 101
6.2 Séchage des matériaux de réparation 106
6.2.1 Profils de teneur en eau des matériaux de réparation 106
6.2.2 Existence d'une épaisseur seuil de séchage pour les réparations 109
6.2.3 Effet des cycles d'humidité relative sur le séchage des réparations 111
6.3 Déformations libres et empêchées dues au séchage 113
6.3.1 Déformations libres sur plaques 114
6.3.2 Déformations hygrométriques empêchées sur les réparations 120
6.4 Synthèse et conclusions 125

Chapitre 7 - Adhérence des réparations **127**
7.1 Caractérisation de l'adhérence 127
7.1.1 Critère de rupture 127
7.1.2 Analyse et choix du type d'essai de traction 129
7.1.3 Analyse statistique des résultats d'essai de traction 132
7.2 Adhérence initiale des réparations 133
7.2.1 Influence de la nature du matériau de réparation 134
7.2.2 Effet de l'épaisseur de réparation 135
7.3 Durabilité de l'adhérence des réparations 135
7.3.1 Influence de la nature du matériau de réparation 135
7.3.2 Effet de l'épaisseur de réparation 137
7.3.3 Influence de la fissuration sur l'adhérence 139
7.4 Synthèse et conclusions 140

Chapitre 8 - Fissuration des réparations 141
8.1 Fissuration de surface 141
8.1.1 Apparition de la fissuration 142
8.1.2 Influence de l'épaisseur de la réparation 142
8.1.3 Influence de la nature du matériau de réparation 146
8.1.4 Cinétique et processus de fissuration 152
8.1.5 Remarques concernant l'aspect visuel de la fissuration de surface 159
8.1.6 Synthèse de l'étude de la fissuration de surface 160
8.2 Fissuration interne 162
8.2.1 Remarques préliminaires sur la nature de la fissuration 163
8.2.2 Morphologie des fissures 163
8.2.3 Profondeur de propagation des fissures dans la réparation 167
8.2.4 Mécanisme de propagation des fissures à l'interface 169
8.2.5 État de fissuration à 28 jours 172
8.2.6 État de fissuration à 2 ans 173
8.2.7 Synthèse de l'étude de la fissuration interne 174
8.2.8 Discussion sur la fissuration interne 176
8.3 Conclusion sur l'étude de la fissuration 178

PARTIE III: ÉTUDE NUMÉRIQUE DE LA FISSURATION DUE AU SÉCHAGE DANS LES RÉPARATIONS

Chapitre 9 - Risque de fissuration au jeune âge des réparations minces en béton **181**
9.1 Calcul du dégagement de chaleur et de la cinétique d'hydratation 182
9.1.1 Aspects théoriques 182
9.1.2 Données expérimentales 183
9.1.3 Simulations 186
9.1.4 Résultats 187
9.2 Évaluation des contraintes dues au retrait endogène empêché 189
9.2.1 Aspects théoriques 189
9.2.2 Données expérimentales 191
9.2.3 Simulations 192
9.2.4 Résultats 193
9.3 Conclusion 198

Chapitre 10 - Séchage et contraintes induites par le séchage dans une réparation mince en béton **199**
10.1 Séchage d'un système réparation-support 199
10.1.1 Aspects théoriques du modèle de séchage utilisé 199
10.1.2 Données expérimentales nécessaires au modèle de diffusion 202
10.1.3 Validation du modèle de séchage et du choix des paramètres de diffusion 206
10.1.4 Maillage, conditions aux limites et simulations effectuées 207
10.1.5 Résultats 208
10.2 Contraintes et risques de fissuration due au séchage 215
10.2.1 Aspects théorique du calcul mécanique 215
10.2.2 Coefficient de dilatation hydrique des matériaux étudiés 216
10.2.3 Maillages, conditions aux limites et simulations effectuées 218
10.2.4 Distribution des contraintes dans une réparation soumise au séchage 219
10.2.5 Risque de fissuration due au séchage dans une réparation mince 224
10.3 Conclusion 226

Chapitre 11 - Modélisation numérique de la fissuration due au séchage dans une réparation mince en béton **227**
11.1 Aspects théoriques du modèle de fissuration probabiliste 228
11.1.1 Concepts de base et hypothèse du modèle 228
11.1.2 Critères de fissuration 230
11.1.3 Prise en compte des effets d'échelle et de l'hétérogénéité du béton 232
11.1.4 Paramètres de sortie du modèle de fissuration probabiliste 234
11.2 Modélisation de l'interface entre le support et la réparation 235
11.2.1 Notion d'interface 235
11.2.2 Modélisation de l'interface 236
11.2.3 Résultats 240
11.3 Détermination de la cohésion du matériau d'interface 241
11.4 Maillages et conditions aux limites utilisés dans l'ensemble des simulations numériques 244
11.4.1 Maillages des structures réparées simulées 244
11.4.2 Conditions aux limites simulées 245
11.5 Propriétés des matériaux utilisés dans l'ensemble des calculs 248
11.6 Influence de la rigidité relative du matériau de réparation et de l'interface sur la fissuration 250
11.6.1 Simulations effectuées 250
11.6.2 Résultats 253
11.7 Influence de l'épaisseur et du matériau sur la fissuration 263
11.7.1 Influence de l'épaisseur de la réparation 263
11.7.2 Influence de la nature du matériau de réparation 267
11.7.3 Conclusions 278
11.8 Fissuration due aux échanges hydriques avec le support 280
11.8.1 Pompage de l'eau du matériau de réparation par le support 280
11.8.2 Poursuite du séchage dans le support 288
11.8.3 Conclusions 292
11.9 Comparaison des résultats des simulations avec les mesures Expérimentales 294
11.10 Conclusions 298

PARTIE IV : SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

Chapitre 12 - Synthèse et conclusion générale **302**
12.1 Objectifs et méthodologie 302
12.2 Principaux résultats 303
12.2.1 Comportement hygrométrique des réparations 303
12.2.2 Adhérence des réparations 304
12.2.3 Fissuration des réparations 304
12.3 Recommandations pour la conception des réparations 307
12.3.1 Recommandations générales 307
12.3.2 Exemples de cas pratiques de réparations 310
12.4 Perspectives de recherche 313

Bibliographie **316**

Annexe 1 Résultats des essais de fluage en traction **321**

Annexe 2 Relevés de température et d'humidité sur le site d'exposition des réparations **326**

Annexe 3 Déformations hygrométriques des plaques d'épaisseur 50 mm pour les quatre matériaux **329**

Annexe 4 Paramètres de fissuration de surface des réparations **331**

Annexe 5 Relevé de fissuration de surface des réparations **332**

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Concevoir et réaliser une réparation sur une structure en béton est un problème complexe qui ne relève pas seulement d'un savoir-faire technique. C'est aussi un réel problème d'ingénierie des structures et des matériaux. Il s'agit d'un problème complexe, car il fait intervenir des propriétés mécaniques et physiques des bétons dont certaines sont encore mal connues ou avec lesquelles les ingénieurs sont encore peu habitués à travailler. Le comportement mécanique du système composé de la réparation et de son support est encore plus mal connu.

Lorsque l'on conçoit une réparation, le principal objectif, outre celui de redonner à la structure ses qualités initiales, est de garantir la durabilité de l'intervention. La durabilité d'une réparation se traduit essentiellement par une fissuration minimisée ou évitée, et également par l'obtention d'une adhérence au support qui soit suffisante et qui ne se détériore pas dans le temps. Dans la plupart des cas, le principal défi consiste à éviter ou à maîtriser la fissuration. Pour une réparation, une des sources principales de fissuration sont les contraintes de traction engendrées par le retrait empêché.

Actuellement, de nombreux produits commerciaux spécifiques aux réparations sont disponibles sur le marché des matériaux de construction. La composition de ces matériaux, qui ne sont pas toujours des matériaux cimentaires, est souvent gardée secrète par le fabricant, et leurs propriétés mécaniques et physiques ne sont pas toujours bien connues. De plus, les concepteurs de réparations n'ont pas beaucoup de retour d'expérience sur l'utilisation de ces matériaux.

Un des principaux problèmes qui se posent actuellement est qu'il n'existe aucun ensemble de règles de conception des réparations en béton qui permette aux

ingénieurs d'en garantir le bon fonctionnement et la durabilité. Avant toute chose, il est donc nécessaire de mieux connaître et de mieux comprendre le comportement mécanique du système formé par la réparation et son support, ainsi que les mécanismes physico-chimiques mis en jeu. Seules des recherches conduites dans cet objectif permettront d'élaborer des règles de conception et par la suite de développer des matériaux spécifiquement adaptés au problème des réparations.

C'est dans ce cadre général de recherche que s'inscrit le travail présenté ici. L'objectif des recherches qui ont été menées était de mieux comprendre le processus et les mécanismes de fissuration due au retrait empêché dans les réparations minces en béton. Le terme "réparation mince" fait référence à des réparations d'épaisseur inférieure à 100 mm. Il ne s'agissait donc pas d'étudier une technique particulière de réparation, ni une gamme spécifique de produits commerciaux de réparation, mais plutôt de contribuer à la compréhension des phénomènes. En particulier, l'objectif était de savoir si le séchage et le retrait qu'il provoque peuvent conduire à la fissuration et au décollement des réparations.

La méthodologie générale du projet repose sur 2 études principales complémentaires l'une de l'autre. La première est une étude expérimentale in situ du comportement hygrométrique et mécanique de réparations minces en béton soumises à un chargement hygrothermique. La seconde est une étude par modélisation numérique de la fissuration due au retrait restreint dans les réparations soumises au séchage.

La thèse est divisée en trois parties:

La première partie regroupe les chapitres 1 à 4. Les 3 premiers chapitres proposent une étude bibliographique des phénomènes et des mécanismes mis en jeu dans la problématique des réparations et dressent un bilan des connaissances en matière de durabilité des réparations, notamment en ce qui à trait à l’adhérence et à la fissuration. Le chapitre 4, qui conclut la première partie du mémoire, décrit le contexte, les objectifs, la méthodologie du projet de

recherche. Il présente également les différents essais et les outils numériques qui ont été utilisés au cours du projet.

La seconde partie, formée par les chapitres 5 à 8, présente la caractérisation des matériaux de réparation ainsi que les résultats de l'étude expérimentale in situ du comportement hygrométrique et mécanique des réparations. On y trouve notamment une étude sur la durabilité de l'adhérence et une étude sur la fissuration due au retrait empêché.

La troisième partie, constituée des chapitres 9 à 11, présente les résultats de l'étude numérique sur la fissuration due au séchage dans les réparations.

Enfin, le chapitre 12 dresse une synthèse générale des résultats, propose quelques recommandations pour la conception des réparations minces en béton soumises à un chargement hydrique et suggère quelques perspectives de recherche.

PARTIE I :

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE,
CONTEXTE, OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE DE L'ÉTUDE

CHAPITRE 1

LES PHÉNOMÈNES AGISSANT SUR LE COMPORTEMENT DES RÉPARATIONS SOUS CHARGEMENT HYDRIQUE

Une réparation en béton est un cas particulier de déformations empêchées. Dès lors, tous les phénomènes chimiques et/ou physiques qui provoquent des déformations au sein du matériau auront une influence sur le comportement mécanique des réparations. Ce chapitre présente une synthèse des principaux phénomènes pouvant affecter le comportement et la durabilité des réparations en béton.

1.1 HYDRATATION ET RETRAIT ENDOGENE

1.1.1 L'hydratation et ses conséquences physiques

La réaction d'hydratation du ciment avec l'eau est un ensemble de réactions chimiques qui engendrent une variation de volume au sein de la pâte de ciment durcie ayant des effets mécaniques importants. Pour un volume donné de réactifs, l'hydratation du ciment forme un volume d'hydrates inférieur d'environ 8 à 12% à celui des constituants (Buil, 1979)(Le Chatelier, 1900). Ce phénomène est connu sous le nom de « contraction Le Chatelier ». Au départ, cette contraction est libre de se produire. Mais rapidement, le durcissement du squelette d'hydrates s'oppose à la diminution de volume qui résulte de l'hydratation. Cela crée une dépression dans l'eau interstitielle des pores capillaires qui provoque un changement de phase liquide-vapeur et conduit ainsi à une autodessiccation de la matrice cimentaire (Hua, 1992). Avec l'avancement de l'hydratation, il y a apparition d'un réseau gazeux connecté dans les pores. La concomitance de ce réseau gazeux avec la phase liquide amène la création d'interfaces liquide/gaz et donc l'apparition de tensions capillaires. Celles-ci doivent être équilibrées par une contraction de la matrice cimentaire qui se

traduit à l'échelle macroscopique par un retrait qui constitue le retrait endogène. Plus le diamètre des pores est petit, plus les tensions capillaires sont importantes (loi de Laplace appliquée à un pore cylindrique). Cela conduit à une autodessiccation et donc à un retrait endogène plus importants.

Même si d'autres mécanismes ont été envisagés pour expliquer le retrait dû à la réaction d'hydratation, comme la variation de la tension superficielle des particules colloïdales (Wittman, 1968) ou encore la variation de la pression de disjonction au sein des pores des CSH (Powers, 1968) (Bazant, 1972), le mécanisme des pressions capillaires est celui qui semble l'emporter sur les autres (Hua, 1995).

Cette autodessiccation de la pâte de ciment est un phénomène en principe homogène qui ne génère donc pas de gradient de déformation au sein du matériau. Il s'agit d'un phénomène intrinsèque au matériau qui est fortement dépendant de sa formulation (type de ciment, présence de fines, volume de pâte, rapport e/c). Les bétons hautes performances, de faible rapport e/c et ainsi de microstructure très dense, présentent un retrait endogène de cinétique plus rapide et d'amplitude plus élevée que celui des bétons ordinaires.

1.1.2 Conséquences mécaniques de l'hydratation et du retrait endogène

L'hydratation et le retrait endogène ont sur le plan mécanique plusieurs conséquences. Tout d'abord, la réaction d'hydratation est une réaction exothermique conduisant, dans les ouvrages de masse, à d'importantes élévations de température. La diffusion de la chaleur étant un phénomène lent, lors du refroidissement après la prise, le retrait thermique se trouve empêché en peau par le cœur de la structure resté à une température plus élevée. Cela conduit à des contraintes de traction en peau et de compression au cœur provoquant la fissuration de l'ouvrage. Dans le cas des réparations minces où l'épaisseur du recouvrement adhérent ne dépasse pas 100 mm, la fissuration due au retrait thermique empêché n'est pas un problème important.

Dès lors que le retrait endogène est empêché de quelque façon que ce soit (géométriquement dans le cas de certaines structures ou par certaines conditions aux limites comme la présence d'un support dans le cas des réparations), des contraintes de traction peuvent être générées et conduire à la fissuration du matériau. Cet effet mécanique est particulièrement observé au jeune âge, alors que la réaction d'hydratation est très active et que la matrice cimentaire n'a pas encore développé ses propriétés mécaniques optimales. Ce risque de fissuration au jeune âge est particulièrement important pour les bétons de faible rapport e/c possédant une microstructure dense comme les bétons hautes performances. Dans le cas d'éléments minces comme les réparations, un mûrissement efficace à l'eau peut considérablement réduire l'autodessiccation et ainsi le retrait endogène.

1.2 SECHAGE ET RETRAIT DE SECHAGE

1.2.1 Transport de l'eau dans les matériaux cimentaires

Lors du séchage du béton, un déséquilibre thermodynamique est engendré, provoquant un transport d'eau de la matrice cimentaire vers le milieu extérieur. Lorsque le matériau est saturé et que la phase liquide est continue, le transport de l'eau se fait de manière prépondérante sous forme d'un mouvement de liquide. On parle d'écoulement 'capillaire'. La force motrice d'un tel transport est le gradient de pression capillaire, si l'on néglige l'effet de la pesanteur. Pour différentes raisons, notamment à cause de la réaction d'hydratation du ciment qui provoque une autodessiccation, les matériaux cimentaires ne sont que pendant très peu de temps dans un état saturé. La phase liquide se trouve alors rapidement discontinue. Il y a alors coexistence d'une phase gazeuse et d'une phase liquide et ainsi de deux modes de transport de l'humidité. Le transport de l'eau se fait en effet également sous forme vapeur par diffusion et ce de façon de plus en plus prononcée à mesure de la désaturation de l'espace poreux. Lorsque la phase liquide, encore présente dans le réseau, se trouve être dans un état totalement dispersé, il ne peut y avoir mouvement d'eau dans ces îlots capillaires que par suite d'un échange par évaporation-condensation avec la phase gazeuse (Daian, 1988) (Xi et coll., 1994). Cet échange s'effectue de part et d'autre des

ménisques formés aux extrémités des pores capillaires. Lorsqu'il n'existe plus de chemin continu entre ces îlots de phase liquide, c'est à dire aux plus basses teneurs en eau dans le réseau poreux, le flux de masse est alors uniquement du à la diffusion gazeuse.

1.2.2 Mécanisme du retrait de séchage

Actuellement, aucune théorie unifiée n'existe pour expliquer le retrait de séchage dans l'ensemble du domaine d'humidité relative (Hansen, 1987). Plusieurs mécanismes ont été proposés, mais leur combinaison dans le processus global est encore mal connue. Leur action semble cependant liée au niveau d'humidité relative dans l'espace poreux. Pour une humidité inférieure à 40%, on fait appel à la variation de l'énergie superficielle pour expliquer le retrait, alors que pour une humidité comprise entre 40% et 100%, on se réfère plutôt à une variation de dépression capillaire et à l'action de la pression de disjonction entre les feuillets de C-S-H (Baroghel-Bouny, 1998). Toutefois, dans nos climats où l'humidité relative moyenne annuelle est de l'ordre de 70%, la théorie des dépressions capillaires est suffisante pour expliquer le retrait de séchage des bétons en conditions d'exposition extérieures.

Si l'on considère que le transport de l'eau se fait principalement sous forme vapeur par un processus de diffusion depuis les pores capillaires, le retrait de séchage qu'il occasionne peut s'expliquer de la façon suivante. À l'échelle du pore capillaire, pour que l'eau liquide et la vapeur d'eau restent en équilibre, suite à la diminution de la pression de vapeur par diffusion vers le milieu extérieur, la pression du liquide doit décroître en s'évaporant progressivement (Coussy, 1995)(Coussy et coll., 1998). La coexistence d'une phase liquide et d'une phase vapeur génère des tensions à leur interface mettant en compression la matrice cimentaire. Le degré de saturation du béton diminuant, les tensions capillaires augmentent. Ce processus se traduit au niveau macroscopique par une déformation qui constitue le retrait de séchage et qui est globalement corrélée de façon linéaire à la perte de masse de l'échantillon suivant des pentes différentes selon le domaine d'humidité considéré dans le matériau (Baroghel-Bouny, 1998)(Coussy et coll., 1998) (Figure 1.1).

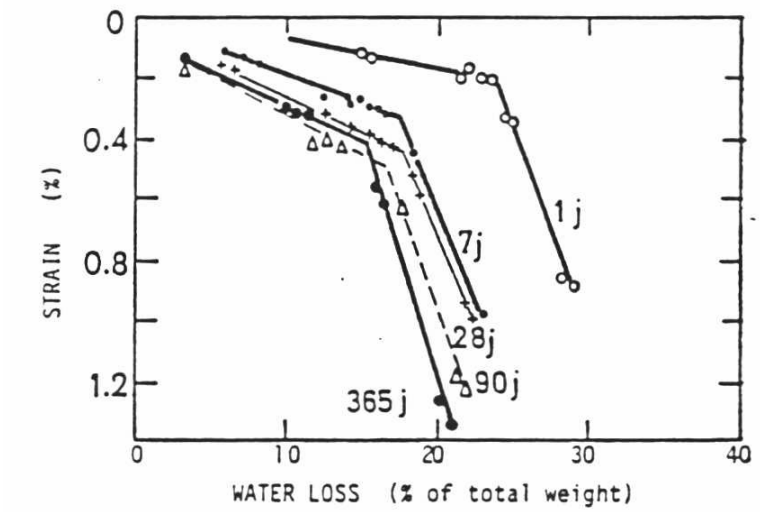


Figure 1.1: Relation entre retrait et perte de masse en conditions contrôlées de température et d'humidité (T=23°C, H.R.=50%)(d'après (Verbeck, 1968)

1.2.3 La fissuration due au retrait de séchage

1.2.3.1 Mécanismes d'initiation et processus de propagation

Le processus de diffusion de la vapeur d'eau est un phénomène extrêmement lent. Cela a pour conséquence de générer d'importants gradients de teneur en eau depuis la surface vers le cœur dans les éléments soumis au séchage. Il y a alors auto restriction de la déformation de retrait. La surface de l'élément est soumise à des contraintes de traction, alors que le cœur est comprimé (Figure 1.2). Cela conduit de façon quasi inévitable à un état de contrainte en peau supérieur à la résistance en traction du matériau et ainsi à une microfissuration de peau du béton. L'auto restriction est d'autant plus importante que la rigidité de la structure est importante. Cette rigidité dépend entre autre de la géométrie de l'élément séchant, des conditions limites et de la nature du béton qui le compose.

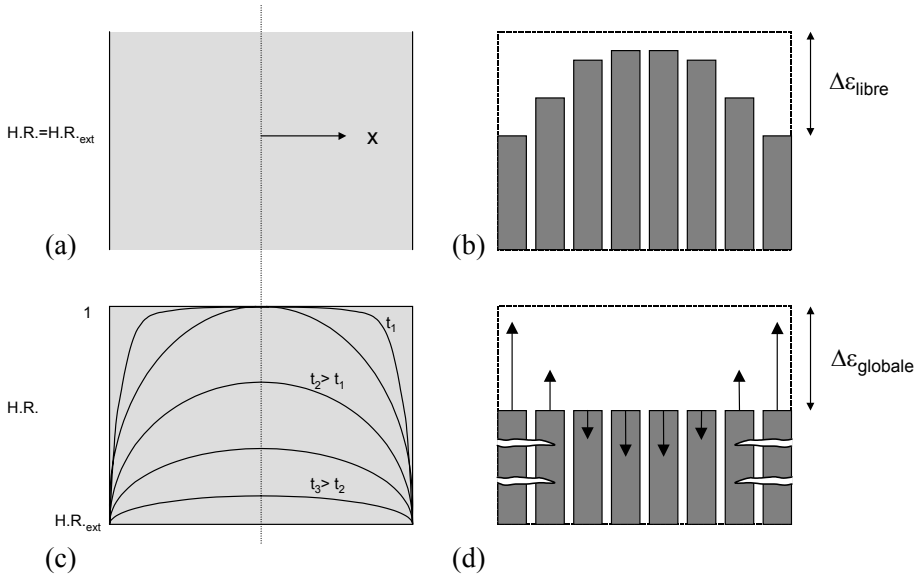


Figure 1.2: Processus de fissuration due au séchage (d'après Bazant, 1982)

Lorsque le séchage est dissymétrique, une flexion (ou «tuilage») de l'élément sera observée. Cette flexion, si celle-ci est empêchée, peut conduire à la fissuration du matériau. C'est ce processus de fissuration par retrait empêché qui mis en jeu lors du séchage des réparations en béton.

L'ouverture des fissures induites par le séchage varie essentiellement suivant l'intensité du retrait et la géométrie de la structure. Les ouvertures peuvent atteindre plusieurs millimètres dans le cas de pièces massives. Tant qu'elles sont peu profondes, leur espacement est petit car leur zone d'influence, directement reliée en élasticité à leur profondeur, est faible. Plus les fissures seront profondes et plus leur espacement sera grand. Lorsque la profondeur des fissures augmente, seule une partie des premières fissures se propage (Acker, 1988). Des calculs élastiques ont montré que les fissures les moins profondes (fissures secondaires) se referment ou cessent de s'ouvrir et que la déformation potentielle se concentre sur les fissures les plus profondes (Abiar, 1986). L'espacement moyen entre fissures se trouve donc augmenté. L'ouverture moyenne étant pratiquement égale au retrait linéique potentiel multiplié par l'espacement moyen entre fissures, cela implique que l'ouverture des fissures n'évolue pas proportionnellement au retrait de dessiccation, mais plus vite (Acker, 1988).

1.2.3.2 Effet de la rigidité de la structure sur la fissuration

La rigidité de la structure soumise au séchage influe beaucoup sur la propagation et l'ouverture des fissures de retrait. Une étude récente sur le comportement des tours de refroidissement d'une centrale nucléaire soumises à un gradient hydrique et thermique (Ulm et coll., 1999) montre qu'un choc hydrique et un fort gradient d'humidité peuvent provoquer rapidement une fissuration importante, tant en profondeur de fissuration qu'en ouverture de fissure, dans une structure en béton armé fortement rigide (Figure 1.3). Le processus de fissuration est le suivant: après un choc hydrique qui a généré des fissures réparties sur toute la surface, le gradient d'humidité important qui existe entre le cœur et la surface de la structure induit la propagation de certaines fissures (les fissures principales) en profondeur alors que les fissures secondaires ne se développent pas ou peu. La fissuration est polygonale avec un espacement entre fissures de l'ordre de 5 à 10 cm et une ouverture maximum des fissures de l'ordre de 60 à 80 µm selon la composition du matériau et le taux de renforcement

1.2.3.3 Influence de la teneur en eau évaporable du matériau sur la fissuration

L'étude de la fissuration des aéroréfrigérants de centrale nucléaire (Ulm et coll., 1999), montre que la fissuration est directement corrélée à la perte en eau engendrée par le séchage dans la structure (Figure 1.4). Parmi les différentes propriétés des matériaux, outre la résistance en traction (qui conditionne notamment la réponse en fissuration initiale), les propriétés hydriques, c'est à dire la diffusivité et la quantité d'eau libre accessible au séchage[1], sont les propriétés qui gouvernent respectivement la cinétique et l'amplitude de la fissuration due au séchage.

---

[1] La teneur en eau évaporable se définit comme la différence entre la teneur en eau à saturation et la teneur en eau à l'équilibre avec l'humidité extérieure.

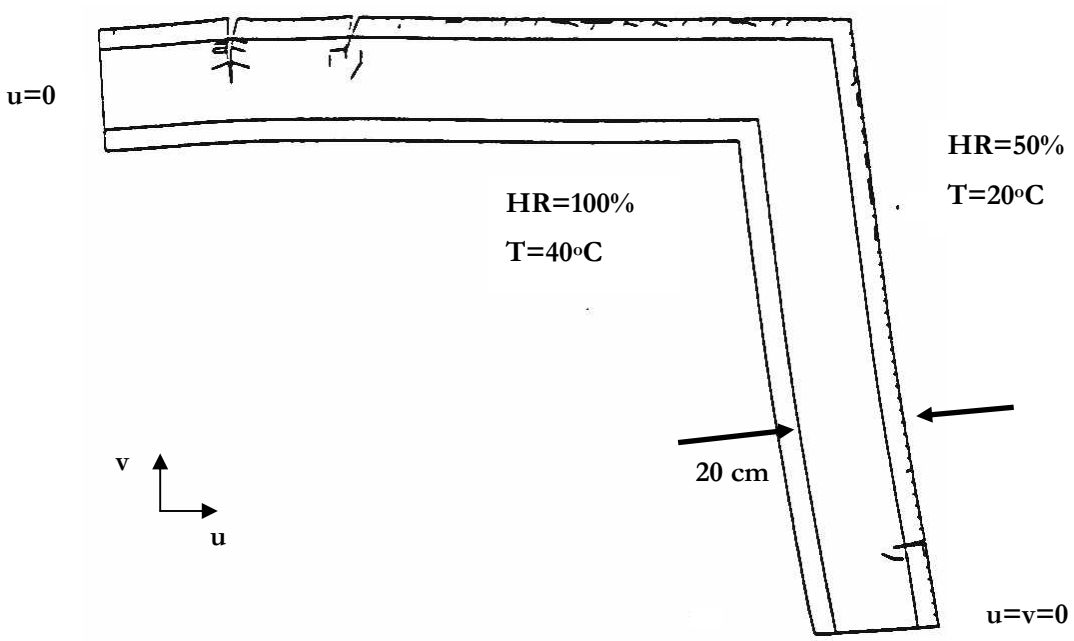


Figure 1.3: Patron de fissuration d'une section d'un aéroréfrigérant de centrale nucléaire, 5 jours après un choc hydrique entre 100% et 50% d'humidité relative (d'après Ulm et coll., 1998)

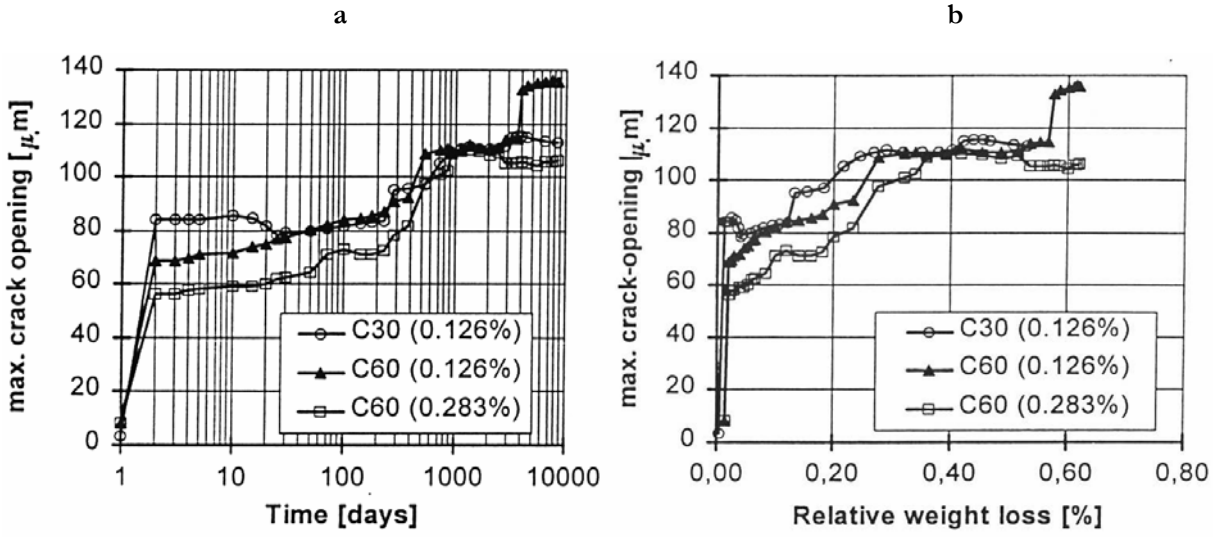


Figure 1.4: Fissuration due au retrait de séchage dans une structure en béton armé pour 2 bétons différents (C30: béton de 30 MPa avec 46 kg/m^3 d'eau évaporable, C60: béton de 60 MPa avec 56 kg/m^3 d'eau évaporable) et pour 2 taux de renforcement en acier (0,126% et 0,283%), en fonction du temps (a) et de la perte relative de masse (b) (d'après Ulm et coll., 1999)

1.3 COMPORTEMENT VISCOELASTIQUE DES MATERIAUX CIMENTAIRES

Lorsqu'un élément en béton est soumis à un chargement constant ou dont la vitesse est petite, il exhibe une déformation élastique instantanée mais également une déformation différée qui se poursuit dans le temps à taux décroissant tant et aussi longtemps que le chargement est appliqué. Cette déformation supplémentaire est appelée déformation de fluage. Lorsque le matériau ne subit pas d'échange hydrique avec l'extérieur, il s'agit de fluage propre. Sinon il s'agit de fluage de dessiccation. Lors du déchargement, une déformation dite de recouvrance est enregistrée. Elle se compose d'une partie instantanée et d'une partie différée. C'est différents phénomènes sont illustrés à la Figure 1.5.

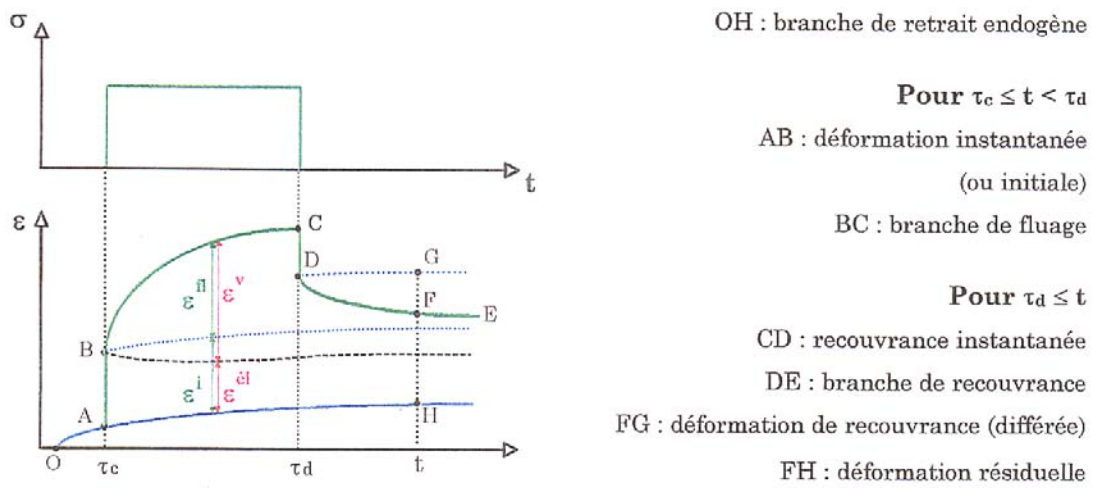


Figure 1.5: Décomposition des déformations sous charge et après décharge (d'après Guénot, 1996)

1.3.1 Mécanismes physiques à l'origine du fluage propre

Même s'il n'existe aucune théorie unifiée expliquant le comportement viscoélastique des matériaux cimentaires, trois sont généralement acceptées. Il s'agit de la théorie de la migration de l'eau, de la théorie de l'écoulement visqueux et de la théorie de la microfissuration. Celles-ci agissant à des échelles de temps et du matériau différentes, elles se complètent relativement bien. En effet, le fluage des bétons est probablement dû à l'action de plusieurs mécanismes.

Afin de mieux comprendre les origines du comportement viscoélastique des matériaux cimentaires, il est important de s'intéresser, comme nous le verrons, à la cinétique de la déformation visqueuse car cela permettra d'établir une liaison entre le comportement observable durant un essai et les mécanismes mis en jeu à l'échelle microscopique.

Il est possible de distinguer un fluage à court terme d'un fluage à long terme. En effet, l'énergie d'activation[2] mise en jeu en cas de fluage évolue rapidement d'un niveau faible vers un niveau plus élevé dans un délai assez court après le chargement (Day et coll., 1983). Cela a de plus été récemment mis en évidence expérimentalement (Guénot, 1996). Il a en effet été constaté que la vitesse de fluage spécifique dJ/dt [µm/m/MPa/d] possède deux régimes cinétiques en fonction de l'âge du matériau (Figure 1.6).

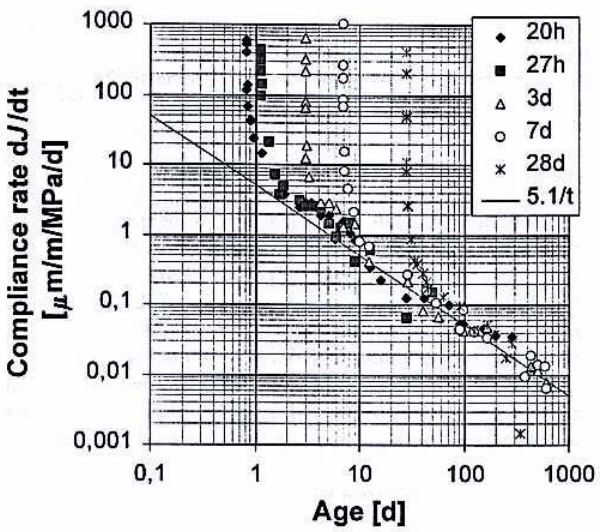


Figure 1.6: Vitesse de fluage propre spécifique d'un béton ordinaire (e/c=0,5) selon l'âge au chargement (Ulm et col., 1998)

Le premier régime cinétique est de courte durée (de l'ordre de quelques jours) et est très sensible à l'âge au chargement. Il diminue avec le durcissement du

---

[2] L'énergie d'activation est l'énergie requise pour qu'un processus physico-chimique thermoactivé s'initie.

matériau. Il est ainsi fortement relié à l'hydratation. Le second régime cinétique, de plus long terme, ne dépend que de l'âge du matériau et ne dépend pas de la maturité au chargement, ni de l'historique de chargement. Il est aussi intéressant de remarquer que cette cinétique de fluage à long terme est indépendante de la formulation du béton (Guénot, 1996)(Ulm et col., 1998). Cela permet donc de rattacher ce régime cinétique à un mécanisme de fluage mettant en jeu les CSH de la matrice cimentaire.

En terme de mécanismes, cette partition de la déformation visqueuse en deux régimes cinétiques a permis de distinguer deux mécanismes principaux à l'origine du fluage des matériaux cimentaires.

Le *fluage à court terme* est attribué à une redistribution, induite par la charge appliquée, de l'eau évaporable contenue dans les pores capillaires. En effet, sous l'application d'une charge extérieure, les contraintes sont transmises au niveau macroscopique du matériau à travers les couches d'hydrates entourant les pores capillaires. Ce transfert de charge induit localement un déséquilibre thermodynamique au sein des molécules d'eau adsorbées. Afin de restituer l'équilibre entre les forces d'attraction des CSH et la pression de disjonction, l'eau est expulsée et diffuse des zones d'adsorption gênée vers les zones de moindre pression des pores capillaires (Figure 1.7).

Ce processus entraîne une contraction de la matrice qui se traduit au plan macroscopique par une déformation différée. Ce mécanisme est directement influencé par l'hydratation. En effet, plus celle-ci est avancée, plus le chemin de diffusion augmente et moins la matrice contient d'eau évaporable (influence sur la cinétique) et plus le squelette d'hydrates est rigide et s'oppose à cette déformation (influence sur l'amplitude). Enfin, cette déformation de fluage à court terme est réversible (recouvrance instantanée), puisque son origine est un gradient de teneur en eau.

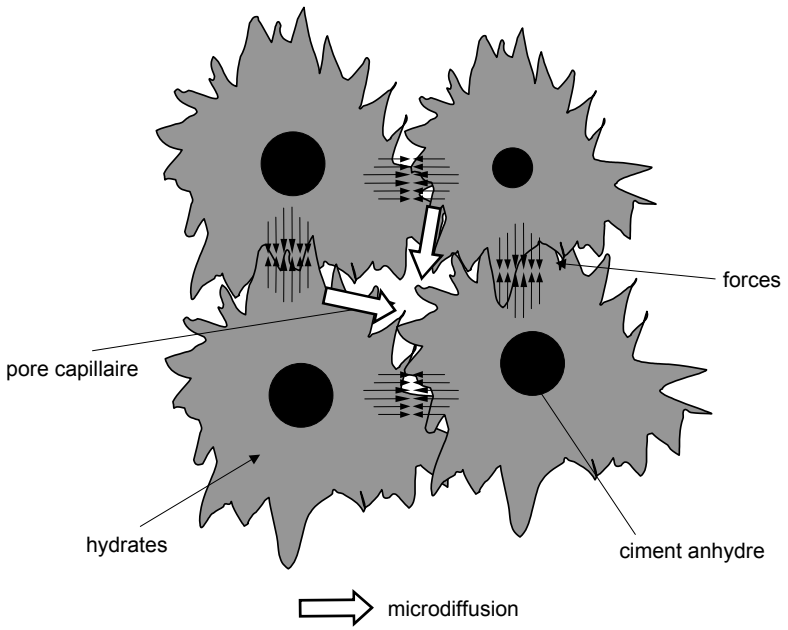


Figure 1.7: Mécanisme du fluage à court terme (Ulm, 1998)

Le *fluage à long terme* a pour origine un mécanisme de glissement relatif entre les surfaces solides des hydrates de la pâte de ciment. Ce mouvement serait dû à un processus du type dislocation, c'est à dire mettant en jeu des ruptures, des propagations et des reformations de liaisons physico-chimiques entre les hydrates au niveau des zones d'adsorption gênée et plus généralement dans les nanopores (Figure 1.8) (Bazant et col., 1997). L'eau contenue dans ces zones interfoliaires serait à la fois siège de cisaillement et agent de liaison entre les surfaces des hydrates. Le fluage à long terme est partiellement réversible car de nouvelles liaisons sont susceptibles de se reformer dans les zones de plus basse énergie et d'être assez fortes pour subsister après chargement (Mullick, 1972) (Bazant et coll., 1997).

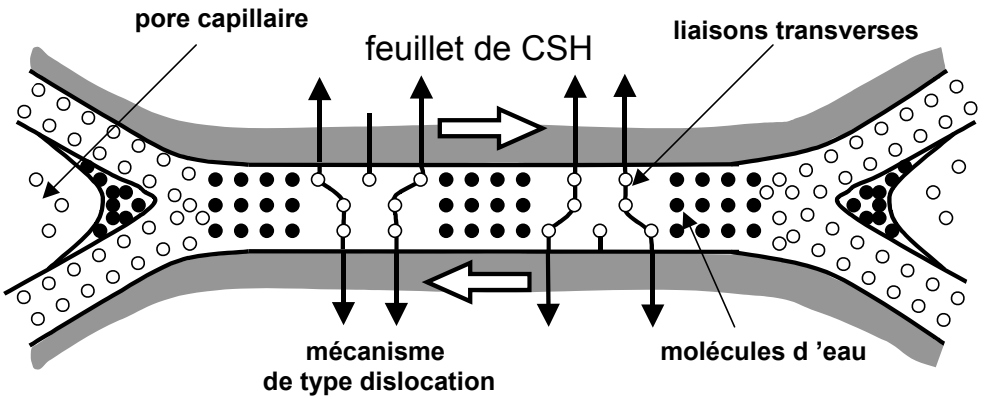


Figure 1.8: Mécanisme de fluage à long terme (d'après Bazant, 1997)

1.3.2 Théorie de la microfissuration

Le béton est un matériau qui, même sous aucun chargement, est dans un certain état de contraintes provoquant une microfissuration de l'interface pâte/granulat. Lors d'un essai de fluage, à partir d'un certain niveau de contrainte, la microfissuration initiale du matériau est susceptible de se développer et d'augmenter de façon significative la déformation différée. Il est également possible qu'à un niveau de contrainte proche de la résistance du matériau, le fluage couplé à la microfissuration soit en mesure d'entraîner la rupture du matériau. Notons également que certains essais suggèrent que cet effet de la microfissuration dans le mécanisme de fluage est beaucoup plus important en traction qu'en compression (Bissonnette, 1996). Des résultats récents de relaxation en traction par fendage sur des éprouvettes préentaillées ont montré que la relaxation des contraintes était associée à des événements acoustiques témoignant d'un processus de fissuration dans le matériau en particuliers pour des niveaux de chargement important (Dénarié, 2000).

1.3.3 Fluage de dessiccation

Lorsqu'une éprouvette de béton, sous charge constante de compression, est soumise au séchage, la déformation de fluage enregistrée est beaucoup plus importante que lorsque l'essai est conduit à humidité constante. Cette

déformation supplémentaire résulte de deux phénomènes complémentaires, à savoir un fluage de dessiccation intrinsèque au matériau et un fluage de dessiccation structural (Granger et coll., 1997). La partie du fluage de dessiccation intrinsèque au matériau est encore très mal connue. En revanche, pour ce qui est du fluage de dessiccation structural, il pourrait être expliqué de la façon suivante (Acker, 1988)(Rossi et coll., 1988): dans un essai de retrait libre, la déformation mesurée inclue la microfissuration de peau créée par le séchage différentiel. Dans un essai de fluage en compression, les contraintes de traction générées par le séchage sont compensées et ainsi la déformation globale résultante de retrait est fortement augmentée. Cela conduit à une augmentation significative de la déformation différée, mesurée comme étant la différence entre la déformation totale et la déformation de retrait.

1.4 CHRONOLOGIE, CINETIQUE ET INTERDEPENDANCE DE CES PHENOMENES

Les phénomènes physico-chimiques qui viennent d'être présentés apparaissent à des âges différents et suivant des cinétiques différentes au cours de la vie d'une réparation. Leur prise en compte dans l'analyse du comportement mécanique d'une réparation est rendue difficile par le couplage qui existe tant sur le plan chronologique que sur le plan physique entre ces différents phénomènes.

1.4.1 Chronologie

Le retrait endogène, le retrait de séchage et le fluage sont des phénomènes qui surviennent à des moments différents au cours de la vie d'une réparation en béton. Ils se prolongent toutefois sur des durées suffisamment longues pour qu'un couplage intervienne.

Le retrait endogène ayant pour origine la réaction d'hydratation du ciment avec l'eau, est le phénomène qui survient en premier au cours de la vie d'une réparation. Au jeune âge du matériau, le retrait endogène est donc le phénomène principal qui influe sur le comportement mécanique d'une réparation. Cela est

d'autant plus vrai lorsqu'une cure à l'eau efficace (empêchant les échanges avec le milieu extérieur) est mise en œuvre durant les premiers jours suivants la mise en place du matériau de réparation. Lorsque la cure est arrêtée, le séchage du matériau va engendrer des déformations qui viendront s'ajouter à celles causées par le retrait endogène. Le chargement hygrothermique n'en sera que plus important. Le séchage étant un processus de diffusion, il s'agit d'un phénomène extrêmement lent. Il prendra ainsi effet sur des durées pouvant atteindre plusieurs années notamment pour les réparations d'épaisseurs les plus importantes. Au bout d'un certain temps (de l'ordre de quelques jours à deux semaines), l'hydratation étant quasi terminée, l'évolution du retrait ne sera alors dû qu'au séchage seul. Quant au comportement différé, il sera initié dès la mise en charge du matériau par les contraintes engendrées par le retrait restreint. Il est toutefois important de remarquer que le fluage est d'autant plus important que le niveau de charge est élevé. Au jeune âge du matériau, la capacité de fluage est plus importante, mais dans notre cas, le niveau de charge est plus faible.

1.4.2 Cinétique

Non seulement le retrait endogène, le retrait de séchage et le fluage n'interviennent pas au même moment durant la vie d'une réparation, mais ils ont également des cinétiques très différentes.

Le retrait endogène est un phénomène dont la cinétique évolue rapidement au cours du temps. Au cours des premières vingt-quatre heures, elle est très rapide. C'est en effet au jeune âge du matériau que la réaction d'hydratation est la plus active et engendre l'autodessiccation la plus intense et donc le retrait endogène le plus important (Figure 1.9). Après 24 heures, la vitesse de déformation de retrait endogène commence déjà à diminuer.

A plus long terme, même si des grains de ciment anhydre existent encore, la déformation de retrait endogène ralentit considérablement et tend à se stabiliser vers une déformation limite. Des mesures de retrait endogène menées sur des bétons de différent rapport e/c montrent un changement significatif dans la cinétique de déformation après 10 à 20 jours (Figure 1.10). À cet âge du matériau,

la cinétique d'hydratation est trop lente pour changer de façon significative la pression capillaire et pour engendrer une autodessiccation suffisante pour expliquer la poursuite de la déformation endogène mesurée. Les déformations endogènes mesurées à long terme pourraient ainsi être attribuées à un fluage de la matrice cimentaire sous l'effet de la pression capillaire quasi-constante (Hua, 1995)(Ulm et col., 1998). De façon générale, de part les mécanismes mis en jeu et leur forte corrélation, la mesure macroscopique de retrait fait endogène fait toujours intervenir une part plus ou moins importante de fluage.

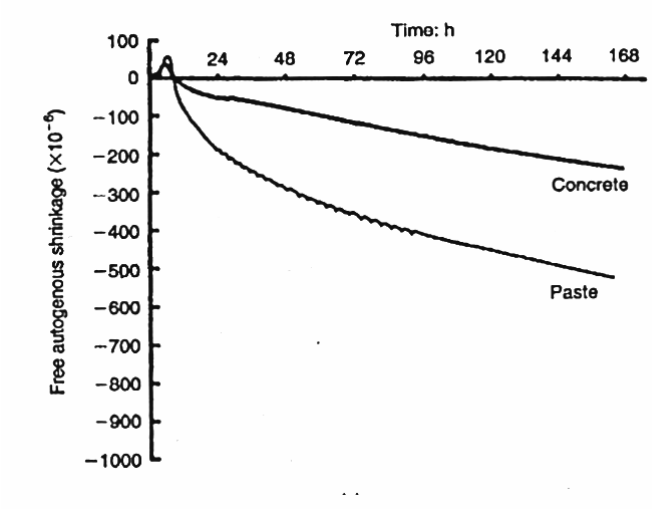


Figure 1.9: Retrait libre endogène pour une pâte et un béton de rapport e/c=0,25 (d'après Igarashi et col., 1999)

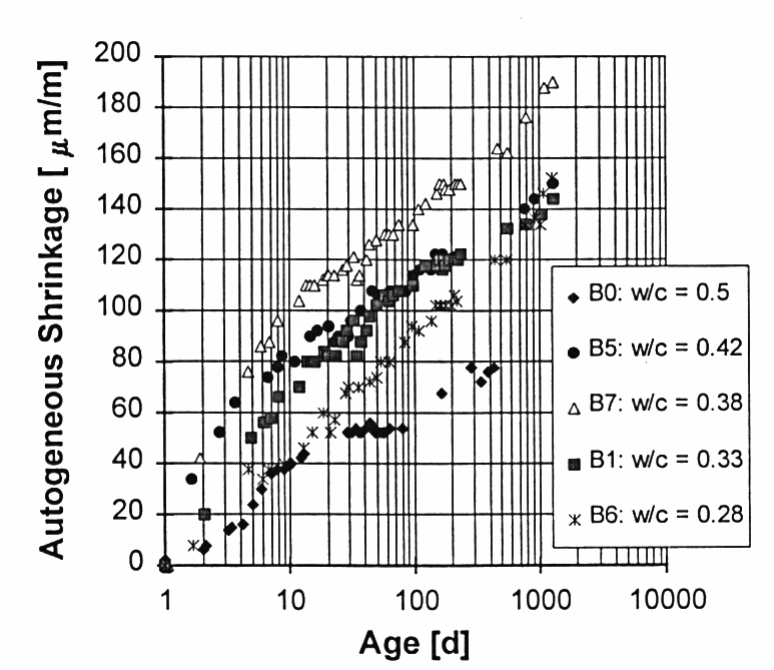


Figure 1.10: Retrait endogène en fonction du temps pour des bétons de différents rapports e/c (d'après LeRoy, 1996)

Le retrait de séchage survient dès qu'un échange d'eau sous forme liquide ou vapeur est engendré entre le milieu extérieur et le réseau poreux du matériau de réparation. Au tout début des échanges hydriques, la déformation de retrait de séchage est rapide et importante du fait du très fort gradient d'humidité qui existe entre le matériau et l'extérieur. Au début du séchage, les plus gros pores capillaires se vident rapidement de leur eau engendrant des déformations de retrait importantes malgré des ménisques dont le rayon de courbure est important. Mais par la suite, le séchage étant un processus diffusionnel, sa cinétique devient extrêmement lente. À mesure de l'avancée du séchage dans le matériau, les dépressions capillaires à l'origine du retrait mesurée au plan macroscopique ont lieu dans des pores de tailles de plus en plus petites et plus lents à se vider. Plus la taille des pores diminue, plus l'humidité relative nécessaire pour les vider doit être faible.

1.4.3 Interdépendance

Le retrait endogène, le retrait de séchage et le fluage sont non seulement des phénomènes couplés sur le plan chronologique, mais ils mettent en jeu des processus physico-chimiques interdépendant.

Un couplage important qui survient dans la vie d'une réparation mince en béton est celui qui existe entre le séchage et l'hydratation. En effet, le séchage peut nuire à la réaction d'hydratation lorsqu'il agit prématurément (dans le cas d'un décoffrage rapide et/ou d'une cure insuffisante). La réaction d'hydratation du ciment nécessite en effet une quantité minimum d'eau pour se réaliser dans des conditions optimales. Il est ainsi possible que les premiers millimètres de pâte depuis la surface de la réparation aient un degré d'hydratation plus faible qu'au cœur de la réparation. Cela a deux conséquences majeures. Cela peut conduire d'une part à des propriétés mécaniques moindres (notamment la résistance en traction) en surface de la réparation. D'autre part, ce couplage avec le séchage peut générer un gradient de degré d'hydratation et ainsi un gradient de retrait endogène (Khelidj et coll., 1998). Ces gradients conduisent à des effets de structure pouvant se traduire par de la fissuration de surface. Enfin, l'arrêt de l'hydratation en surface de la réparation pourrait aussi faciliter, par une résistance en traction plus faible, la fissuration de retrait de séchage en peau.

Le second type de couplage est celui qui existe entre le retrait en général et le comportement différé des matériaux cimentaires. Il a été mis en évidence, pour des chargements en compression (mais cela semble aussi être le cas en traction (Bissonnette, 1996)), que la déformation de fluage est augmentée lorsque le matériau testé subit des échanges hydriques avec l'extérieur (effet Pickett). Le retrait endogène, conséquence directe de l'hydratation, est aussi fortement corrélé au fluage propre.

Il est maintenant bien démontré que le fluage d'un matériau cimentaire est directement proportionnel à sa teneur en eau. Plus l'humidité interne est élevée et plus la déformation de fluage est importante, ce qui est logique compte tenu du mécanisme de microdiffusion de l'eau qui est mis en jeu (cf. 1.3.1). Toutefois, lorsqu'un échange hydrique est établi avec le milieu extérieur, la déformation de

fluage est nettement plus importante. Ce phénomène complexe est encore mal expliqué (cf. 1.3.3). Mais il montre de façon claire le couplage qui existe entre les mécanismes de transfert de l'eau et les mécanismes de fluage dans les matériaux cimentaires. Il a notamment été démontré expérimentalement que le fluage de dessiccation est directement proportionnel au retrait de séchage. Cette proportionnalité signifie que le retrait et le fluage sont contrôlés, sous conditions de séchage, par la cinétique des échanges hydriques avec l'extérieur (Ulm et coll., 1998).

De la même façon, un couplage existe entre le retrait endogène et le fluage propre des matériaux cimentaires. Au cours d'essais de retrait endogène, on s'aperçoit que la cinétique change au bout de 10 à 20 jours. Cela met en évidence un changement dans les mécanismes à l'origine de la déformation mesurée. Au jeune âge, le retrait endogène est causé par les changements de volume et par les dépressions capillaires qu'engendre la réaction d'hydratation (cf. 1.1.1). Mais à plus long terme, la seconde cinétique de retrait ne saurait être une conséquence de la réaction d'hydratation. En effet, des déformations endogènes sont encore mesurées alors que l'hydratation du ciment est pratiquement inactive (Le Roy, 1996). La déformation de retrait endogène à long terme pourrait être attribuée à un fluage de la matrice cimentaire sous pression capillaire quasi-constante (Hua, 1995). Ce couplage entre le retrait endogène et le fluage propre est mis en évidence par la proportionnalité entre la déformation endogène et la déformation différée (Figure 1.11). Ainsi, de la même façon que pour le retrait de séchage et le fluage de dessiccation, cela montre que le mécanisme à l'origine de la cinétique du retrait endogène à long terme coïncide avec le mécanisme de fluage propre à long terme, à savoir un glissement du type dislocation entre les feuillets de C-S-H. Le fait que retrait et fluage trouvent leur origine dans des mécanismes similaires confirme que ce qui est mesuré comme étant du retrait endogène comporte une part de fluage propre.

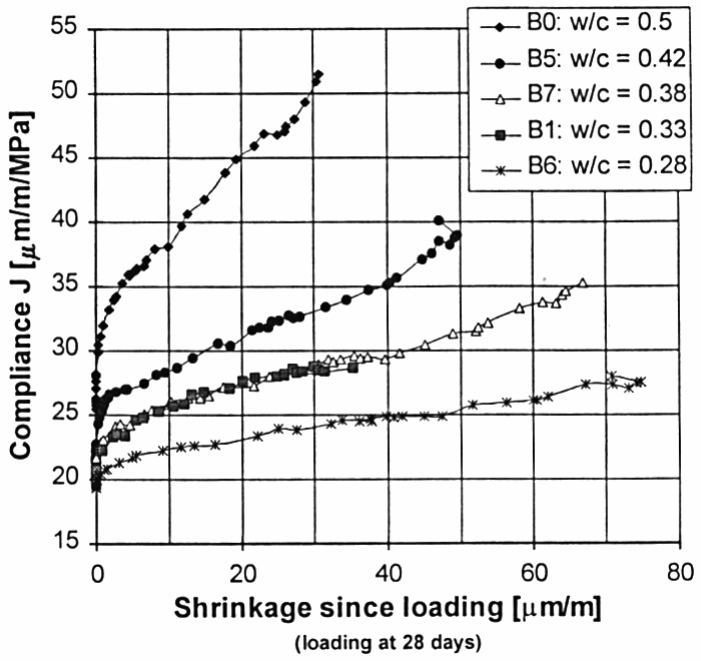


Figure 1.11: Couplage entre fluage propre et retrait endogène (d'après Ulm et coll., 1998)

Ces différents couplages entre retrait en général et comportement viscoélastique sont importants pour l'étude du comportement mécanique des réparations minces sous chargement hygrothermique. En effet, ce couplage qui existe entre le retrait et le fluage nous permet de penser qu'une partie non négligeable des contraintes de retrait restreint pourra être relaxée. Toutefois, à des niveaux de charge élevés et dans des situations où des gradients de déformation importants sont mis en jeu, nous ne savons pas si la nature des couplages entre retrait et fluage demeure la même ou bien si la relaxation des contraintes par fissuration devient inévitable.

CHAPITRE 2

COMPATIBILITÉ DÉFORMATIONNELLE ET CAPACITÉ D'ADAPTATION DES MATÉRIAUX DE RÉPARATION

La mise en place d'un béton jeune sur un support de béton plus ancien provoque différents types de problèmes, tant physico-chimiques que mécaniques, liés à la compatibilité au sens large des deux matériaux en contact. La compatibilité n'étant jamais parfaitement assurée, notamment en ce qui concerne les variations volumiques, la capacité d'adaptation du matériau sera un paramètre important pour la durabilité de la réparation. Ce chapitre présente une synthèse de ces deux concepts, nécessaires à la durabilité des réparations minces en béton.

2.1 LE CONCEPT DE COMPATIBILITÉ

Lorsqu'un matériau de réparation est mis en place sur un support de vieux béton, il se pose alors le problème de leur compatibilité. Cette compatibilité peut prendre différents aspects, tant chimique que déformationnelle ou encore être une compatibilité exprimée en terme de perméabilité (Emmons et col., 1994) (Figure 2.1). Chaque type de compatibilité est sensible à des facteurs différents. Il ne sera présenté dans le cadre de cette étude que la compatibilité déformationnelle.

2.1.1 Compatibilité déformationnelle

Dès sa mise en place, le matériau de réparation est le siège de variations volumiques causées aussi bien par la réaction d'hydratation du ciment (retrait endogène, retrait thermique) que par le séchage (retrait de dessiccation). Dans la mesure où le béton du support est stable hydriquement et que l'hydratation est inactive, les variations volumiques du matériau de réparation seront restreintes

par la présence du support. Le matériau qui constitue le support de la réparation est de plus un matériau dont l'hydratation est terminée et donc dont les propriétés mécaniques, notamment le module élastique, sont élevées comparativement au matériau de réparation.

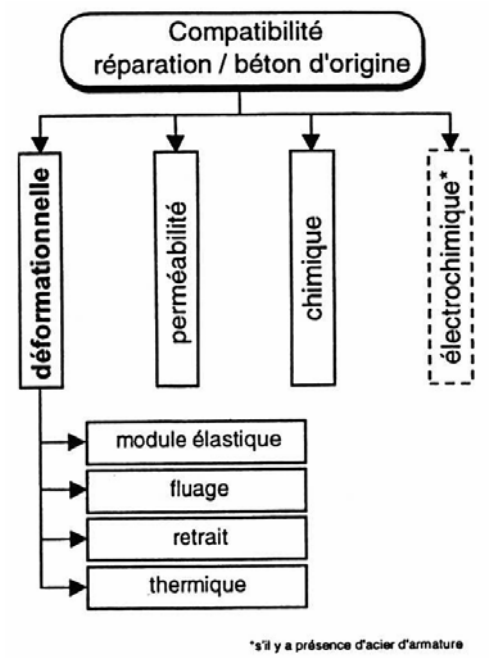


Figure 2.1: Les différents types de compatibilité et les principaux facteurs qui influencent la compatibilité déformationnelle (d'après Emmons et coll., 1994)

Le retrait de séchage engendre un gradient de déformations depuis la surface jusqu'à l'interface entre les deux matériaux. Du fait de sa restriction par le support et par l'épaisseur même de la couche de réparation, ce gradient va générer des contraintes de traction en peau et de compression au cœur (Figure 2.2). Avec l'avancement du séchage, toute l'épaisseur de la réparation sera le siège de contraintes de traction. Ces contraintes vont, en peau, rapidement atteindre la limite élastique du matériau et ainsi induire de la fissuration. Avec l'avancement du séchage, les fissures vont s'ouvrir, se multiplier et se développeront plus en profondeur dans la couche de réparation.

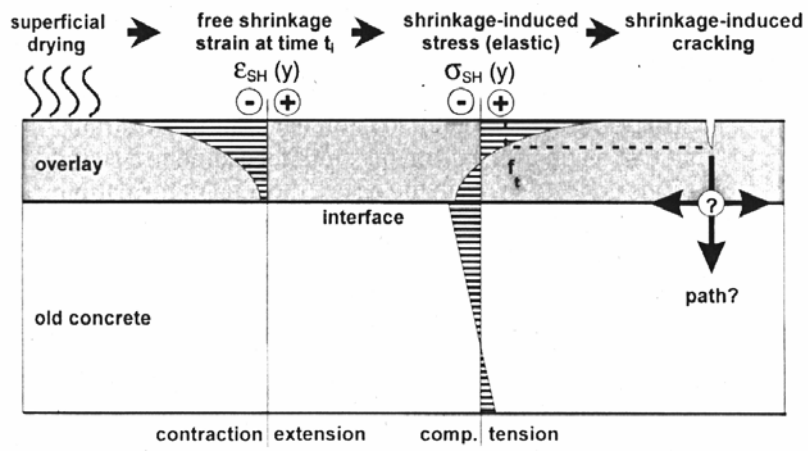


Figure 2.2: Représentation schématique des contraintes de retrait restreint dans les réparations (d'après Bissonnette, 1996)

Afin d'éviter la création de contraintes de traction trop importantes dans la réparation, et ainsi de minimiser voire d'éviter la fissuration de retrait restreint, il est nécessaire que le matériau de réparation et le support soient compatibles en terme de déformation. Un matériau de réparation ayant une bonne capacité déformationnelle sera donc un matériau qui sera soumis à peu de déformations empêchées qui sont sources de contraintes de traction et de fissuration.

2.1.2 Les méthodes d'obtention de la compatibilité déformationnelle

L'obtention d'une bonne compatibilité déformationnelle peut se faire de différentes façons. L'un des moyens consiste à utiliser un matériau dont le retrait est faible. Cela peut être obtenu par l'utilisation d'un adjuvant réducteur de retrait ou encore par l'utilisation d'un ciment expansif. Dans le premier cas l'adjuvant va réduire la tension de surface de l'eau présente dans les pores capillaires et dont le départ est à l'origine de la dépression capillaire qui engendre la déformation macroscopique de retrait. Dans le second cas, l'expansion causée par la cristallisation contrôlée d'ettringite va compenser la déformation de retrait. Ces deux voies ne sont pas encore très développées actuellement et demeurent au stade de la recherche. Bien sur, minimiser le retrait de séchage peut aussi se faire en utilisant des matériaux dont la microstructure est très dense et donc dont la

porosité est très fine. Mais cela n'est possible qu'avec des bétons de faible rapport eau/ciment et comportant souvent de la fumée de silice dans leur composition. Or ce sont des matériaux susceptibles de développer une autodessiccation très importante et conséquemment un retrait endogène important. Le retrait total (endogène plus séchage) ne serait donc probablement pas beaucoup plus faible et des problèmes de fissuration au jeune âge pourraient être créés.

Un autre moyen d'obtenir une compatibilité déformationnelle adéquate est d'améliorer le comportement mécanique du matériau de réparation. Cela peut se faire en utilisant des matériaux de forte résistance en traction. Malheureusement, ce sont souvent des matériaux riches en ciment et de rapport eau/ciment faible et donc dont le retrait endogène va être élevé. Une autre possibilité consiste à utiliser des fibres d'acier qui donneront au matériau une meilleure capacité à contrôler la fissuration en la rendant plus diffuse et en minimisant les ouvertures de fissures.

Enfin, le dernier moyen qui sera abordé dans le cadre de cette étude consiste à utiliser un matériau dont le potentiel de fluage est important comparativement au retrait qu'il développe au cours du temps. Cela introduit le deuxième concept important pour la durabilité des réparations, à savoir celui de la capacité d'adaptation par fluage.

2.2 LE CONCEPT DE CAPACITÉ D'ADAPTATION

Le retrait et le fluage des matériaux cimentaires sont deux phénomènes qui sont couplés tant sur le plan chronologique que sur le plan des mécanismes physiques mis en jeu. Le retrait de séchage additionné au retrait endogène engendre des contraintes importantes au sein de la couche de réparation, notamment en surface. Il y a alors deux possibilités. Soit le potentiel viscoélastique du matériau est suffisamment important pour permettre la relaxation des contraintes de retrait par fluage, soit la relaxation ne pourra se faire que par l'apparition de fissures. Il est fort probable que la réalité soit une combinaison de ces deux comportements. L'excellente durabilité de certaines réparations, dont le retrait du

matériau qui les constitue n'est pas négligeable, laisse présumer une réelle possibilité d'adaptation par fluage en situation de retrait restreint (Bissonnette et coll., 2000).

Dans tous les cas, l'adaptation par fluage en situation de retrait restreint résulte d'une compétition entre le retrait et le fluage d'une part, mais aussi entre les contraintes générées et la résistance en traction du matériau d'autre part (Figure 2.3)

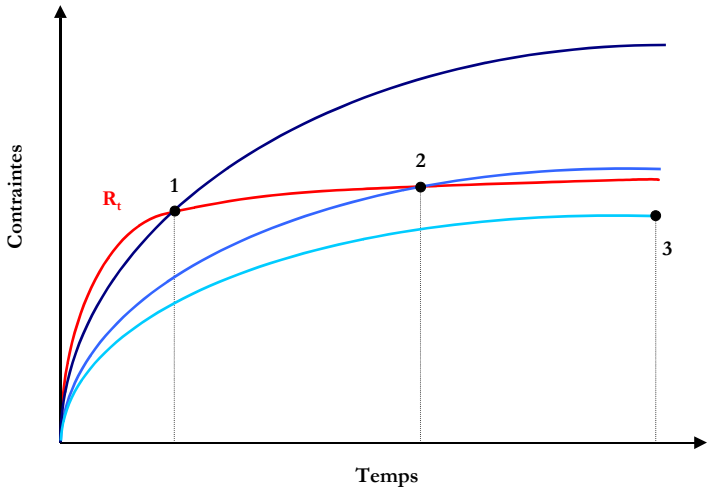


Figure 2.3: Compétition entre le retrait, le fluage et la résistance en traction pour la capacité d'adaptation d'un matériau

Plusieurs comportements sont envisageables selon la capacité d'adaptation par fluage du matériau. Soit le matériau ne développe pas assez de fluage pour relaxer les contraintes de retrait restreint et la fissuration apparaît alors au jeune âge de la réparation (cas1). Soit le matériau développe du fluage de telle façon que l'apparition de la fissuration est fortement retardée mais n'est pas empêchée (cas2). Enfin, soit le matériau développe une capacité d'adaptation parfaite et la relaxation des contraintes par fluage empêche totalement l'apparition de la fissuration (cas3).

La capacité d'adaptation se traduit pour un matériau par le rapport entre la déformation de fluage spécifique (µm/m/MPa) et la déformation de retrait, à un niveau de charge donné et à un instant donné. Ce rapport n'est pas fixe dans le temps, même si le fluage et le retrait sont deux phénomènes couplés. Le matériau

idéal est celui pour lequel, en tout temps, le fluage compenserait le retrait. Cette capacité d'adaptation parfaite du matériau n'est pourtant jamais vérifiée, en particulier lors d'essais de fluage menés après plusieurs jours d'hydratation, c'est à dire à un âge du matériau où la capacité de fluage à court terme est déjà beaucoup moins importante qu'au cours des premières heures de l'hydratation. Au début d'un essai de fluage, le rapport prend une valeur élevée puis tend à se stabiliser vers une valeur asymptotique représentative de la capacité d'adaptation du matériau testé (Figure 2.4).

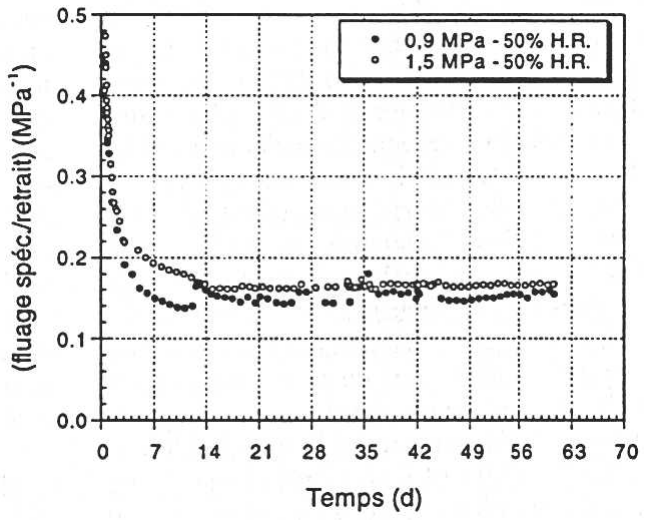


Figure 2.4: Bilan fluage/retrait typique en traction avec échanges hydriques (béton ordinaire: ciment type 10, E/C=0,40; mise en charge à 7 jours, niveau de charge σ/f_t=30% et 50%) (d'après Bissonnette et coll., 2000)

Dans les cas où des gradients de déformation importants sont générés, comme c'est le cas dans les problèmes avec séchage, la relaxation des contraintes de façon à ce qu'aucune fissuration n'apparaisse semble quasiment impossible. En revanche, suivant la capacité d'adaptation du matériau, la fissuration de surface se développera plus ou moins vite et surtout plus ou moins profondément. Même si la fissuration n'est pas totalement empêchée, une bonne capacité d'adaptation peut permettre un contrôle efficace de la fissuration en minimisant sa propagation.

2.2.1 Capacité d'adaptation en situation de retrait endogène empêché

Le retrait endogène n'induit pas de gradient de déformation car l'hydratation est, sauf cas particulier, une réaction isotrope. Mais des contraintes importantes, causées par le retrait endogène empêché par la présence du support, peuvent être générées alors que la résistance en traction du matériau de réparation est encore faible. Dans certains cas, en l'absence d'échange hydrique avec l'extérieur, le retrait endogène seul peut provoquer de la fissuration importante au début de la vie de la réparation.

L'étude de la génération de contraintes en situation de retrait endogène restreint et l'étude de la capacité d'adaptation par fluage au jeune âge sont actuellement deux thèmes de recherche de premier ordre dans le domaine des matériaux cimentaires.

Une étude récente sur le sujet (Igarashi et coll., 1999) montre que la contrainte générée peut atteindre 2 à 3 MPa après 100 à 150 heures selon la composition du matériau et la nature du ciment utilisé (Figure 2.5). Dans certains cas où la capacité d'adaptation par fluage n'est pas adéquate et où le retrait endogène est important et se développe avec une cinétique rapide, la limite élastique du matériau peut même être atteinte.

Si l'on compare les contraintes générées et les déformations de retrait endogène, on s'aperçoit que les deux ne correspondent pas toujours. Dans le cas présenté à la figure 2.5, pour un même rapport E/C et un même ciment, la pâte exhibe une déformation de retrait endogène nettement plus rapide et plus importante et cependant les contraintes générées lorsque cette déformation est empêchée sont inférieures à celles générées dans le béton pour lequel la limite de résistance est atteinte. En effet, même si l'amplitude de fluage est du même ordre que celle de retrait endogène pour chacun des deux matériaux, leur rapport est différent (Figure 2.6). Le rapport fluage/retrait est plus élevé dans le cas de la pâte et atteint une valeur proche de 1, d'où sa très bonne capacité d'adaptation.

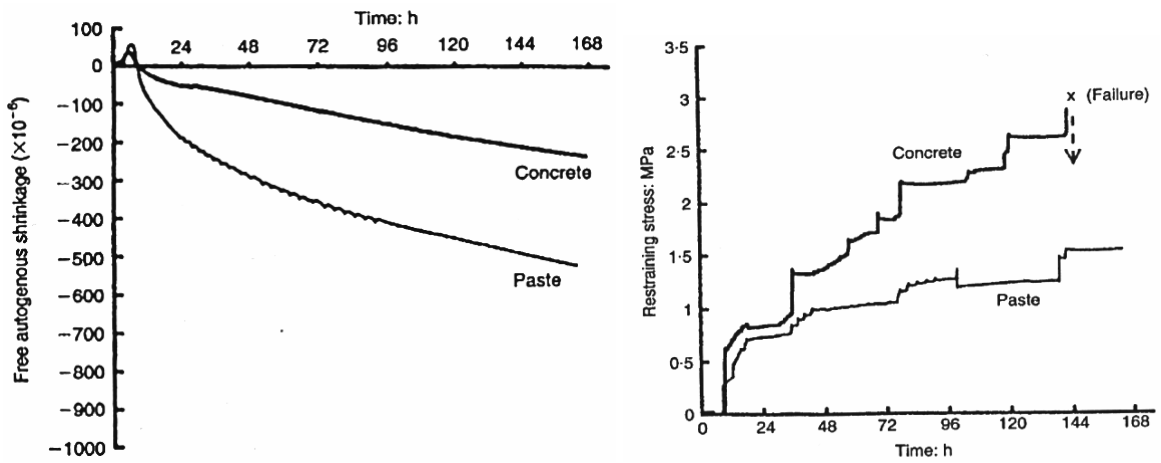


Figure 2.5: Déformations de retrait endogène et développement des contraintes associées (béton et pâte: E/C=0,33, 10% de fumée de silice) (d'après Igarashi et coll., 1999)

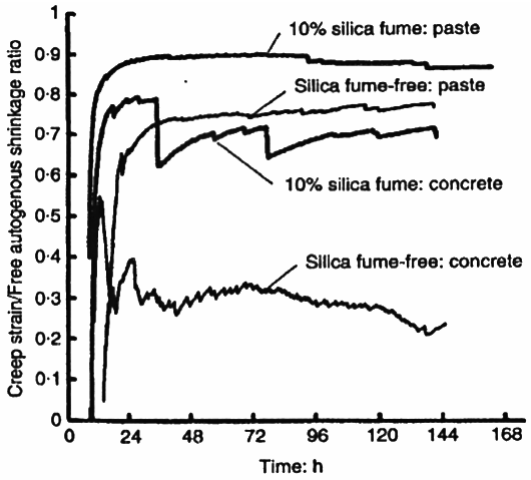


Figure 2.6: Bilan fluage propre/retrait endogène d'un béton et d'une pâte à haute performance (E/C=0,33, sans et avec 10% de fumée de silice) (d'après Igarashi et coll., 1999)

Il semble donc possible que les matériaux qui développent un retrait endogène plus important soient aussi ceux qui ont le potentiel de fluage le plus élevé et ainsi la capacité d'adaptation la meilleure. Cela confirme à nouveau le couplage important qui existe entre les deux phénomènes et le fait que les facteurs qui diminuent l'un diminuent aussi l'autre (Igarashi et coll., 1999). Il semble donc que l'effet de dilution apporté par la présence des granulats sur le retrait endogène soit moins important que la diminution du potentiel de fluage

occasionnée par la diminution du volume de pâte. La meilleure capacité d'adaptation de la pâte face au béton provient également du fait que le module du composite pâte-granulat est plus élevé que celui de la pâte seule. Ainsi, pour un même niveau de déformation empêchée, les contraintes dans le béton seront plus importantes.

Ces résultats récents montrent que la relaxation par fluage joue un rôle majeur dans le contrôle du développement des contraintes de retrait restreint au jeune âge, tout du moins dans les problèmes sans gradient de retrait important. En effet, la capacité d'adaptation au jeune âge des matériaux cimentaires est grande, notamment à cause du potentiel de fluage qui est plus important.

Toutefois, ces observations sont à prendre avec précaution. En effet, le type d'essai de retrait restreint mis en œuvre joue une importance non négligeable sur la réponse du matériau et se trouve souvent plus ou moins éloigné de la réalité existant au sein des structures de génie civil. De plus, la formulation du béton étudié et en particulier la nature du ciment utilisé ont une influence très significative sur le comportement observé, tant de fluage que de retrait.

Dans une autre étude du même type, avec des bétons de même rapport E/C, la rupture de l'éprouvette a été obtenue (Paillere et coll., 1987). Cette étude a été réalisée sur trois bétons de rapport E/C allant de 0,44 à 0,23. Le béton de rapport E/C=0,44 n'a pas fissuré après 672 heures d'essai et les contraintes mesurées sont restées inférieures à 2,5 MPa. En revanche les deux autres bétons se sont fissurés. Celui de rapport E/C=0,3 a fissuré après 352 heures à une contrainte de 3,17 MPa et celui de rapport E/C=0,23 a fissuré après 92 heures pour une contrainte de 3,51 MPa (Figure 2.6)

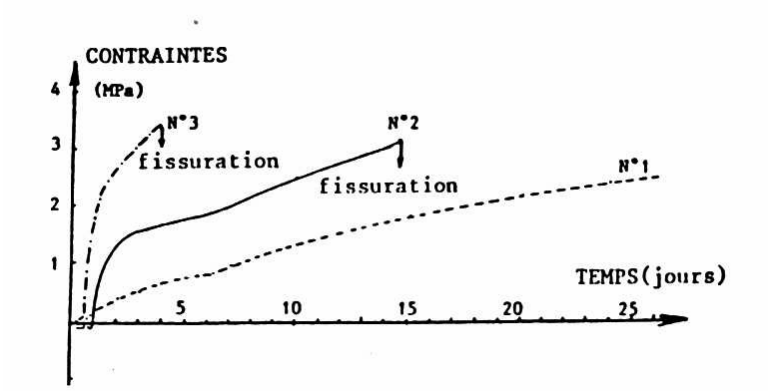


Figure 2.7: Courbes d'évolution des contraintes de retrait endogène restreint (BHP1: E/C=0,44; BHP2: E/C=0,33; BHP 3: E/C=0,23 avec fumée de silice) (d'après Paillere et coll., 1987)

Ces résultats montrent que les bétons ne développant pas un retrait endogène de cinétique suffisamment rapide et d'amplitude suffisamment importante, ne possèdent pas un risque de fissuration important en situation de retrait empêché. Dans leur cas, les phénomènes viscoélastiques ont probablement relaxé une part importante des contraintes générées par le retrait restreint. Certains bétons, de rapport E/C plus faible et comportant notamment des particules fines comme la fumée de silice, ont cependant un risque de fissuration nettement plus important, même si la fissuration intervient seulement après plusieurs jours, voire plusieurs semaines. Dans le cas de ces bétons, le potentiel de fluage est amoindri, notamment pour le fluage à court terme. En effet, le matériau est plus rigide et s'oppose donc d'avantage aux déformations. De surcroît, le chemin de la microdiffusion est plus important du fait de leur porosité capillaire plus faible. La microstructure particulièrement dense des bétons hautes performances en font des matériaux dont la cinétique et l'amplitude de fluage sont moins importantes. Leur capacité d'adaptation en situation de retrait restreint se trouve donc amoindrie.

2.2.2 Capacité d'adaptation en situation de retrait de séchage empêché

Il s'agit là d'un problème tout à fait différent dans la mesure où des gradients de déformation très importants sont générés par le séchage différentiel de la couche de réparation. Ces gradients conduisent à des contraintes de traction non

homogènes dans la réparation. Très élevées en peau, ces contraintes provoquent rapidement la fissuration superficielle du matériau (cf. Figure 2.2). De plus, les contraintes générées par le séchage viennent s'ajouter à celles causées par le retrait endogène empêché.

Des essais de retrait axial restreint ont été conduit sur des bétons à haute performance avec des échanges hydriques avec l'extérieur, après un démoulage à 14 heures. Selon le rapport E/C, la fissuration de l'éprouvette apparaît après 15 minutes (E/C=0,23, avec fumée de silice) ou après 66 heures (E/C=0,44) (Figure 2.8).

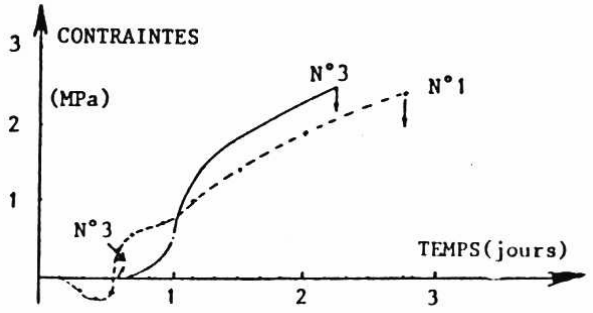


Figure 2.8: Courbes d'évolution des contraintes de retrait de séchage restreint (BHP1: E/C=0,44; BHP2: E/C=0,23 avec fumée de silice) (d'après Paillere et coll., 1987)

Un démoulage après 24 heures ralentit le phénomène, puisqu'une part importante des déformations endogènes se produisent alors de façon libre et ne génèrent donc pas de contraintes. Cela retarde la rupture de l'éprouvette mais ne l'empêche pas, puisque la fissuration survient après 56 heures au lieu de 15 minutes (courbe n°3 de la figure 2.8).

Ces résultats montrent que lorsque des gradients hydriques importants sont engendrés la fissuration survient rapidement. Les problèmes de retrait de dessiccation empêché sont donc plus sévères que ceux de retrait endogène empêché. Il semble ainsi que dans les situations avec échange hydrique, c'est à dire avec des gradients de déformation importants, la fissuration survienne beaucoup plus rapidement que dans les situations sans gradient, c'est à dire de

retrait endogène empêché (Paillere et coll., 1987). Cela semble indiquer que, dans les problèmes où des gradients de déformation et donc de contraintes importants sont mis en jeu, les phénomènes viscoélastiques sont nettement moins efficaces pour relaxer les contraintes générées par le retrait.

Cependant, une capacité d'adaptation par fluage adéquate peut permettre de minimiser et de contrôler la fissuration générée par le gradient de déformation en surface. Une étude récente (Bissonnette, 1996) a montré que selon le bilan fluage/retrait du matériau, la fissuration pouvait se développer plus ou moins profondément et se rendre jusqu'à l'interface réparation-support (Figure 2.9).

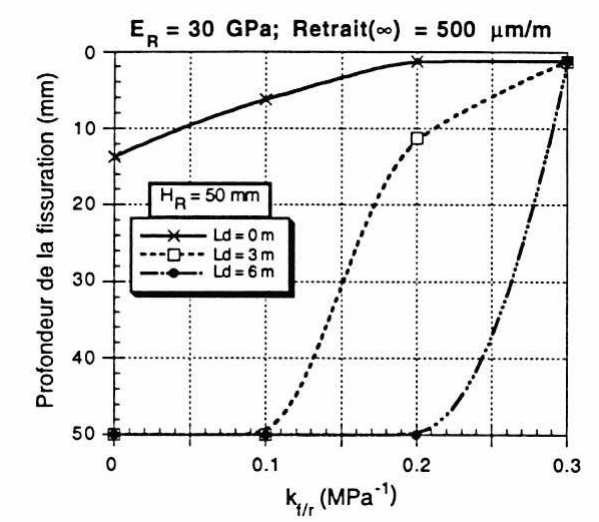


Figure 2.9: Incidence du bilan fluage/retrait (k_{fr}) sur la profondeur de fissuration d'éléments en béton de différentes longueurs (Ld) réparés sur une épaisseur de 50 mm (d'après Bissonnette, 1996)

Ces résultats sont à prendre avec précaution car ils sont issus d'une modélisation numérique simplifiée du comportement au séchage des réparations minces en béton. En effet, la modélisation effectuée ne prend pas en compte la relaxation par fissuration du matériau et fait l'hypothèse que la déformation de fluage est directement proportionnelle à la contrainte générée par le retrait empêché.

CHAPITRE 3

INDICATEURS DE DURABILITÉ D'UNE RÉPARATION EN BÉTON

La durabilité d'une réparation en béton peut s'exprimer sous la forme de différentes propriétés. Ces propriétés sont ce que l'on pourrait appeler des *indicateurs de durabilité*, c'est à dire des paramètres dont l'évolution face à un chargement ou face à un environnement agressif représente le comportement de la réparation. Ces indicateurs peuvent être des propriétés mécaniques ou physico-chimiques. Dans le cas d'un chargement hygrothermique, outre la perméabilité et la diffusivité du matériau de réparation, les indicateurs de durabilité sont essentiellement des propriétés mécaniques. L'indicateur de durabilité qui est le plus rencontré est l'adhérence entre le matériau de réparation et le matériau du support. Mais dans le cas d'un chargement hygrothermique, la fissuration de la couche de réparation est aussi un indicateur de durabilité très significatif du comportement de la réparation. Ce chapitre constitue une synthèse des différents travaux de recherche sur la durabilité des réparations en béton.

3.1 DÉFINITION D'UNE RÉPARATION DURABLE

Une réparation durable est une réparation dont l'adhérence à son support atteint une résistance mécanique suffisamment élevée et surtout qui est stable dans le temps (Saucier, 1990). C’est également une réparation qui développe un minimum de fissuration (Figure 3.1).

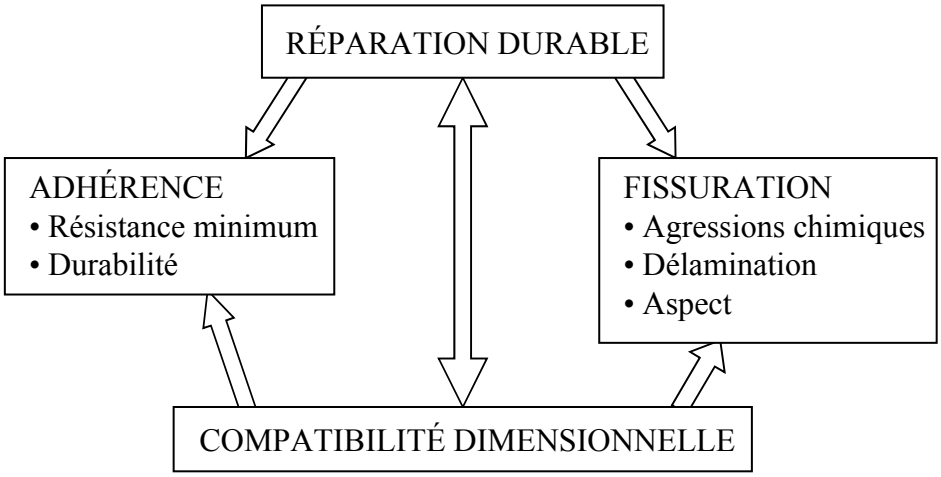


Figure 3.1: Indicateurs de durabilité d'une réparation en béton

Selon le chargement auquel doit faire face la réparation (mécanique, chimique, gel,...), la valeur d'adhérence souhaitée sera différente et la fissuration minimum développée prendra différents aspects (ouverture maximum, densité de fissuration).

3.2 ADHÉRENCE AU SUPPORT

3.2.1 Mécanismes d'adhésion au support

Plusieurs mécanismes physiques sont à l'origine de l'adhésion entre 2 matériaux cimentaires. Différentes théories tentent d'apporter une explication au processus d'adhésion. Les principales théories sont la théorie du blocage mécanique (« mechanical interlocking ») et la théorie de l'adsorption. La réalité est probablement une combinaison des deux théories et surtout une combinaison de plusieurs processus physiques.

3.2.1.1 Théorie du blocage mécanique

Le béton est un matériau poreux et de nature hétérogène. Il comporte un certain nombre de défauts et de cavités ainsi qu'une porosité intrinsèque. Lors de la mise en place du matériau de réparation sur le support de béton ancien, la pâte du nouveau matériau va s'entremêler avec celle du matériau support, créant ainsi

des blocages mécaniques qui vont favoriser l'ancrage mécanique de la réparation à son support (Figure 3.2). La porosité du support, la rugosité induite par la technique de préparation de surface et les propriétés rhéologiques du matériau de réparation sont autant de paramètres importants pour le développement d'un bon ancrage mécanique.

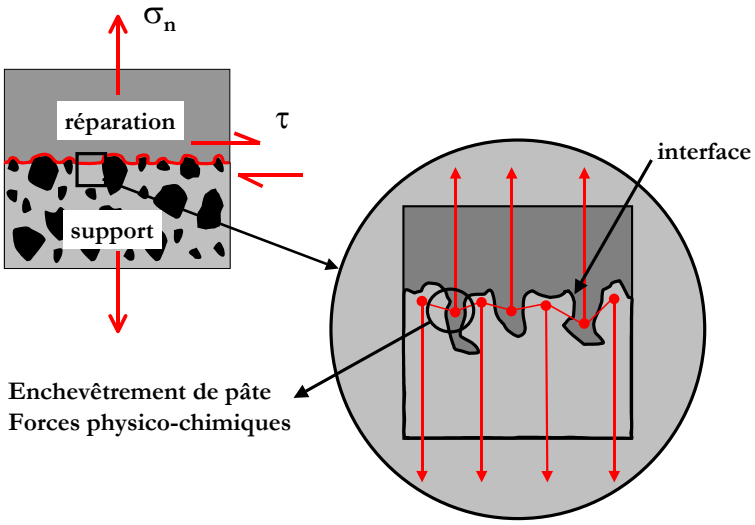


Figure 3.2: Ancrage mécanique de la réparation à son support (d'après Emmons, 1994)

3.2.1.2 Théorie de l'adsorption

Cette théorie met en jeu des forces interatomiques et/ou intermoléculaires à l'interface entre les deux matériaux. Les forces les plus communément rencontrées sont les forces de Van der Waals, les liaisons hydrogènes et les liens chimiques à travers l'interface. On distingue les différentes forces en les comparant en terme d'énergie de liaison. Les plus fortes sont les liaisons primaires qui regroupent les liaisons ioniques et covalentes. Les moins fortes sont les liaisons secondaires qui correspondent aux liaisons hydrogènes et aux forces de Van der Waals (Tableau 3.1).

Tableau 3.1: Énergie de liaison des forces d'adhésion

Type de liaison	**Énergie (kJ/mol)**
Liaisons primaires:	
Liaisons ioniques	60-700
Liaisons covalentes	110-350
Liaisons secondaires:	
Liaisons hydrogènes	jusqu'à 40
Liaisons de van der Waals:	jusqu'à 40
- interactions permanentes dipôle-dipôle	4-20
- interactions dipôle-dipôle induit	inférieure à 2
- forces de dispersion (London)	0,08-40

L'ensemble de ces forces conduit en pratique à des adhésions pouvant atteindre en théorie une centaine de MPa. Mais la présence de vides d'air, de défauts, de singularités géométriques et de tout autre hétérogénéité dans le matériau fait considérablement chuter cette résistance des forces d'adhésion.

Dans la plupart des cas, seules des forces interfaciales secondaires sont mises en jeu. Lorsque des liaisons hydrogènes sont créées, l'adhésion est considérablement augmentée. Dans le cas des matériaux cimentaires, les liaisons hydrogènes, encore appelés "ponts hydrogènes" participent fortement à la cohésion du matériau. Ils peuvent se réaliser par l'intermédiaire des molécules d'eau contenues dans la porosité et celles liées aux C-S-H (Figure 3.3). Ces ponts hydrogènes se mettent en place entre l'eau interfeuillet et les groupes hydroxiles (liés aux atomes de calcium ou de silicium des C-S-H) ou encore entre l'eau interfeuillet et l'eau hydroxilique (qui est une eau lié aux C-S-H de la pâte de ciment).

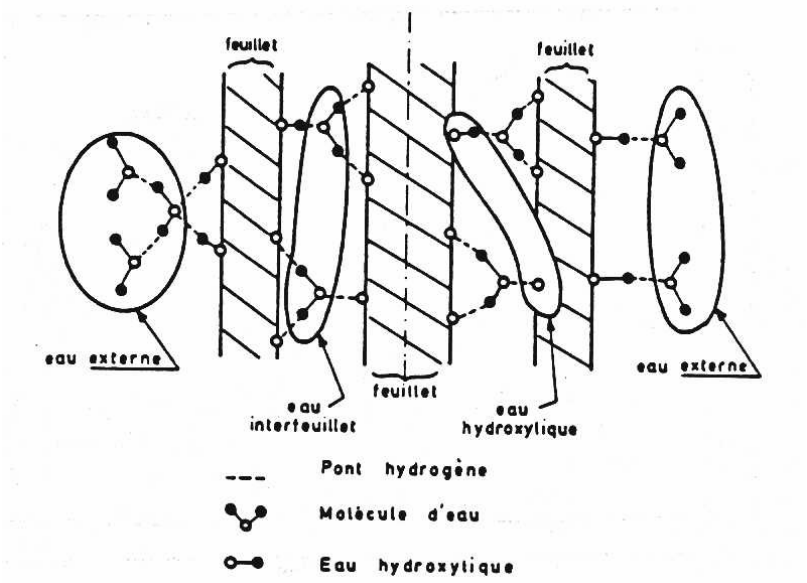


Figure 3.3: Interaction du type liaisons hydrogène dans les matériaux cimentaires (d'après Sierra, 1980)

Ces deux théories, théorie du blocage mécanique et théorie de l'adsorption, expliqueraient l'adhésion qui se développe entre le matériau de réparation et le support. Remarquons que la rugosité de la surface du support joue un rôle prépondérant pour la création de cette adhésion. La rugosité de surface augmente non seulement l'enchevêtrement de pâte, mais elle augmente aussi le degré de contact interfacial et induit ainsi une augmentation de l'adhérence. À ce titre, il faut distinguer deux types de rugosité qui se différencient par leur échelle géométrique: la macrorugosité et la microrugosité. La macrorugosité correspond aux ondulations de surface de quelques millimètre à quelques centimètres. Cette rugosité participe peu à la qualité de l'adhésion mais favorise lorsqu'elle est importante le blocage mécanique qui offre une résistance aux efforts de cisaillement. La microrugosité correspond à une rugosité dont l'amplitude se situe entre quelques microns à 1 millimètre. Elle favorise l'enchevêtrement de pâte et participe donc beaucoup à l'adhésion des deux matériaux. Son amélioration conduit à une adhérence plus élevée de la réparation à son support.

3.2.2 Existence d'une interface et microstructure de la zone interfaciale

Des études ont montré que l'interface entre une réparation et son support pouvait avoir une nature différente des deux matériaux en contact (Grandet, 1971) (Saucier, 1990) (Pigeon et coll., 1992). L'interface entre une réparation et son support peut être comparée à l'interface pâte-granulat. En effet il semble que le support induise, tout comme les granulats le font dans la matrice, un effet de paroi pour le matériau de réparation. Cela provoque la création d'une zone, parfois appelée "zone interfaciale" ou "zone de transition", de propriétés et de microstructure différentes. Le support, constitué de béton déjà durci, empêche l'enchevêtrement des granulats du matériau de réparation avec ceux de la base. Ce premier effet de paroi, à l'échelle des granulats, provoque la création d'une zone plus riche en pâte entre les deux matériaux et ainsi un zone de propriétés mécaniques différentes. De la même façon, mais à une échelle plus petite, le support favorise la création de vides entre les grains de ciment en plus grand nombre que dans la masse de la pâte. De gros cristaux de Portlandite et d'ettringite se forment dans ces vides entre grains de ciment. Dans certains cas, un indice d'orientation de la Portlandite différent a été mesuré proche de l'interface. Cela montre que le support induit la cristallisation de Portlandite avec une orientation préférentielle le long du plan de contact. Ce second effet de paroi, à l'échelle des grains de ciment, tend lui aussi à favoriser la création d'une zone de microstructure et donc de propriétés mécaniques différentes. Enfin, la nature de cette zone de transition est fortement influencée par la possibilité qu'a ou non l'eau de se déplacer par succion entre les deux matériaux selon l'état hydrique du support au moment de la mise en place du matériau de réparation (Grandet, 1971).

Ces observations ont poussé certains auteurs à parler d'une nature composite pour les réparations, non pas à deux, mais à trois matériaux: support, réparation et interface (Emmons et coll., 1994). Il faut cependant apporter un bémol à ces observations et considérations, car dans le cas des matériaux contenant de la fumée de silice et dans le cas de matériaux de faible rapport eau/ciment, la zone de transition n'est plus observée (Saucier, 1990).

3.2.3 Adhérence développée entre la réparation et son support

La résistance du collage entre les deux matériaux est une propriété facilement mesurable par des essais mécaniques et elle constitue un bon indicateur de la durabilité de la réparation, notamment dans le cas des problèmes de compatibilité dimensionnelle. Toute sorte de valeurs d'adhérence sont rencontrées dans la littérature scientifique sur le sujet. En effet, l'adhérence est une propriété qui varie beaucoup selon le type d'essai conduit et selon certains facteurs susceptibles d'influencer l'adhésion comme la préparation de surface, l'emploi ou non d'un agent de liaison ou encore l'état hydrique du support au moment de la mise en place de la réparation.

3.2.3.1 Technique de préparation de surface

Trois techniques sont le plus couramment employées pour préparer la surface du support recevant le matériau de réparation. Il s'agit du marteau pneumatique, de l'hydrodémolition et du sablage. Il est difficile de dire si l'une de ces techniques est meilleure qu'une autre car le résultat varie beaucoup d'un cas à un autre selon le soin apporté à sa mise en œuvre ou tout simplement selon l'état d'endommagement et le type de matériau devant être réparé. Il est toutefois possible de dégager certaines tendances.

Il semble que l'hydrodémolition donne de meilleurs résultats que le marteau pneumatique dans la mesure où cette technique produit peu ou pas de microfissuration dans le support. Toutefois, il est possible d'obtenir de bons résultats avec le marteau pneumatique en utilisant un marteau de faible énergie afin de minimiser la microfissuration. Il semble que celle-ci soit cependant quasi inévitable dans le cas d'une préparation au marteau. Ce qui fait que le marteau pneumatique est la technique la plus répandue est son moindre coût et sa facilité de mise en œuvre par rapport à l'hydrodémolition. Des résultats récents montrent cependant que l’emploi du marteau pneumatique suivi d’un jet de sable permet

l'obtention d'une adhérence aussi élevée que le permet l'utilisation de l'hydrodémolition (Tableau 3.1).

Tableau 3.1: Effet de la technique de préparation de surface sur l'adhérence de réparations en béton projeté (BP1: béton projeté par voie sèche, BP2: béton projeté par voie sèche avec fumée de silice) (d'après (Talbot, 1995))

Type de béton	**Hydro démolition**	**Jet de sable**	**Marteau**	**Marteau + jet de sable**
BP1	1,6	2,0	1,3	1,7
BP2	2,0	2,3	1,1	1,9

Pour comparer les différentes techniques de préparation de surface, il est important de comparer la rugosité qu'elles génèrent à la surface du support, dans la mesure où la rugosité de surface est un paramètre prépondérant pour le développement de l'adhésion. La rugosité peut être caractérisée de différentes façons. Une façon simple consiste à mesurer l'amplitude et la périodicité des crêtes sur le profil de surface (Silfwerbrand et coll., 1985). Les rugosités les plus importantes sont obtenues par hydrodémolition (Tableau 3.2). Cela explique probablement pourquoi les adhérences obtenues par ce type de préparation de surface sont supérieures à celles obtenues avec le marteau pneumatique seul. Le jet de sable semble générer une rugosité nettement plus faible que les deux autres techniques. Or les valeurs d'adhérence qu'il permet d'atteindre sont tout aussi élevées que celles rencontrées par hydrodémolition. Au Tableau 3.2, ce sont des rugosité macroscopiques qui sont présentées. Il est cependant fort probable que pour un bon enchevêtrement de pâte et une plus grande surface de contact entre le support et la réparation, la rugosité microscopique soit également un paramètre très important. C'est vraisemblablement la raison pour laquelle une préparation au jet de sable permet l'obtention d'une adhérence aussi élevée que celle obtenue par hydrodémolition et marteau pneumatique.

Tableau 3.2: Valeur de rugosité suivant la technique de préparation de surface (Silfwerbrand et coll., 1985)

Traitement de surface	**Double amplitude 2a (mm)**	**Période λ (mm)**
Hydrodémolition	7,7	44
Marteau pneumatique	4,9	41
Jet de sable	0,4	32

3.2.3.2 Utilisation d'un agent de liaison

L'utilisation d'un agent de liaison entre le support et le matériau de réparation afin d'accroître l'adhérence est une pratique courante, voire même recommandée dans certains devis de construction. Toutefois, son intérêt n'est pas véritablement établi. Bien souvent l'utilisation d'agent de liaison donne de mauvais résultats suite à une mauvaise mise en œuvre. On trouve toutes sortes de produits vendus comme agent de liaison pour réparation. Les plus répandus sont des enduits époxydiques et des pâtes de ciment modifiées ou non.

Dans le cas des pâtes de ciment, leur utilisation comme agent de liaison, accroît l'adhérence si leur rapport eau/ciment est faible (0,30 et moins). Un fort rapport eau/ciment (de l'ordre de 0,60), comme il est souvent recommandé afin de faciliter la mise en œuvre, tend plutôt à diminuer l'adhérence (Saucier, 1991) (Figure 3.4). Notons aussi que dans certaines problématiques particulières (comme le gel-dégel ou tout autre problème où un transport d'eau est nécessaire à la durabilité de la structure), l'utilisation de pâte de ciment de faible rapport eau/ciment comme agent de liaison nuit à la durabilité de l'adhérence de la réparation (Saucier, 1991).

3.2.3.3 État hydrique du support

L'humidité du support est un aspect important pour le développement de l'adhérence. Un support trop sec risque de "pomper" de l'eau au matériau de réparation et ainsi nuire à son hydratation voire même générer des contraintes de traction proche de l'interface. Un support mouillé risque d'augmenter le rapport eau/ciment de la zone interfaciale et ainsi nuire à l'adhérence en créant une zone de porosité plus importante et de résistance moindre. Il semble que le juste milieu entre ces deux états critique soit le cas le plus favorable au développement de l'adhérence. On parle dans ce cas d'un état hydrique "saturé-surface sèche". Toutefois, dans le cas d'une réparation bien réalisée sous tous ses aspects, il ne semble pas que le fait d'avoir un support humide permette d'obtenir une adhérence plus élevée que dans le cas d'un support sec (Figure 3.5).

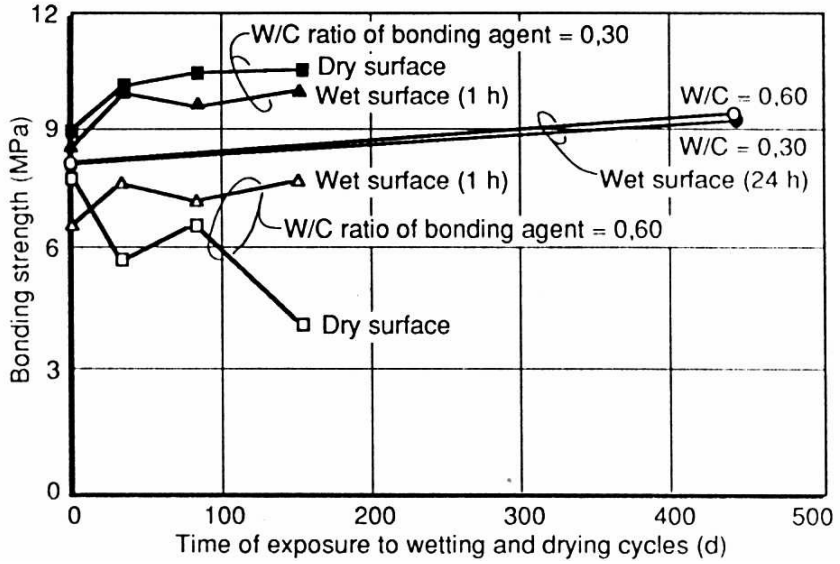


Figure 3.4: Influence d'un agent de liaison sur l'adhérence en cisaillement (sur cubes de 100x100x100 mm) (d'après Saucier, 1991)

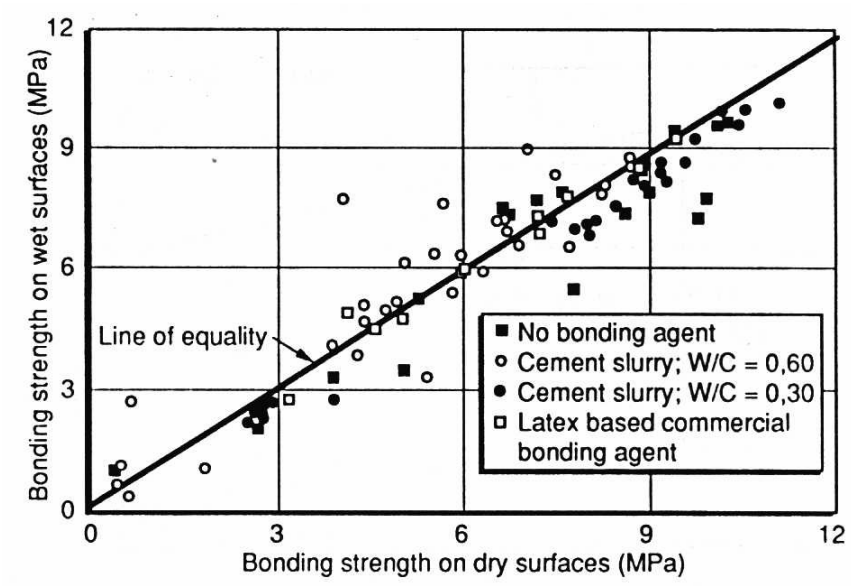


Figure 3.5: Comparaison de l'adhérence obtenue sur supports secs et humides (d'après Saucier et coll., 1991)

3.3 FISSURATION ET ENDOMMAGEMENT DES RÉPARATIONS

Une fois la réparation mise en place, celle-ci va subir des variations dimensionnelles restreintes et des chargements mécaniques qui pourraient nuire à l'adhérence et également au matériau de réparation lui-même. Une mauvaise durabilité de la réparation peut prendre la forme d'une baisse d'adhérence, d'un décollement du resurfaçage, d'un délaminage ou encore de fissuration dans le matériau de réparation (Figure 3.6).

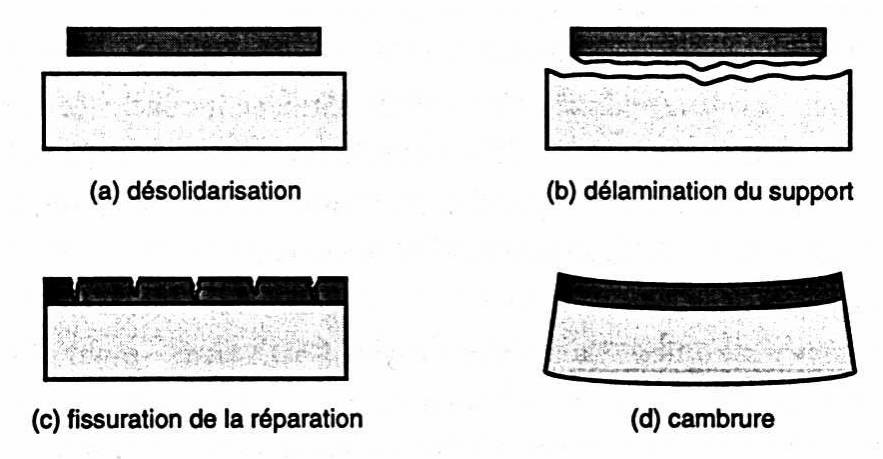


Figure 3.6: Les différents comportements mécaniques et les différents modes d'endommagement d'une réparation soumise au retrait empêché (d'après Saucier, 1990)

3.3.1 Pertes d'adhérence et décollement

Comme nous l'avons vu précédemment, la variation de l'adhérence d'une réparation à son support est un indicateur de durabilité significatif. Une baisse d'adhérence est le gage d'une mauvaise durabilité car elle pourrait à plus long terme conduire au décollement de la réparation.

Une perte d'adhérence peut être causée par différents vieillissements ou encore par de la fissuration propagée dans la zone interfaciale. L'effet de la fissuration sur l'adhérence a encore très peu été étudié. Cela fait d'ailleurs partie des objectifs du présent projet de recherche. En revanche, l'effet de divers vieillissements comme le séchage, les cycles de mouillage-séchage ou de gel-dégel ont été bien étudiés (Saucier, 1990). Il en ressort que le séchage est le mode de vieillissement le plus dommageable pour l'adhérence (Figure 3.7). Les cycles de mouillage-séchage peuvent aussi nuire à l'adhérence comme le montre également la figure 3.7, mais de façon moins significative.

Même si l'effet néfaste du séchage sur l'adhérence des réparations est établi de façon claire, le mode d'endommagement est encore mal connu. Il est possible que le séchage endommage l'adhérence en affaiblissant les liaisons physico-chimiques à l'origine de l'adhésion, notamment celles mettant en jeu des molécules d'eau

comme les liaisons hydrogènes. Mais il est aussi possible que de la microfissuration à l'interface soit à l'origine de la perte d'adhérence. Nous ne savons toutefois pas de quelle façon.

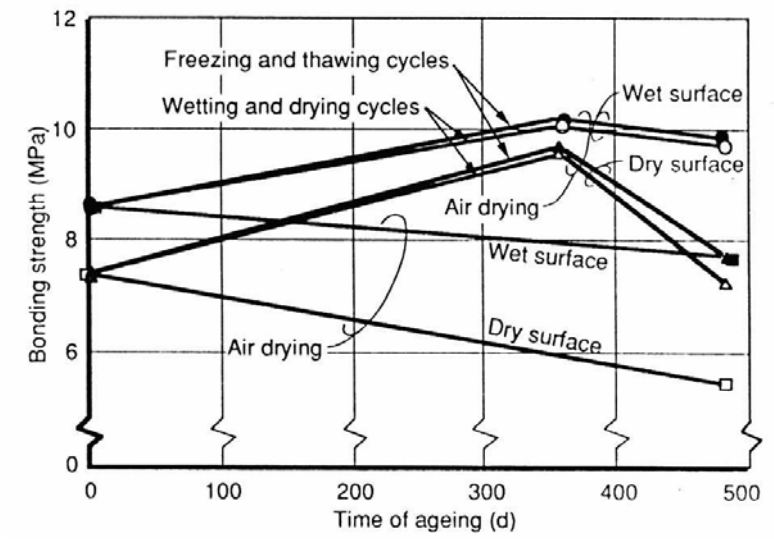


Figure 3.7: Effet de divers mode de vieillissement sur l'adhérence des réparations (d'après Pigeon et coll., 1992)

3.3.2 Fissuration du matériau de réparation

Un autre indicateur de durabilité important est la fissuration qui se développe suite à un chargement ou suite à un problème de compatibilité dimensionnelle. Quantifier la fissuration permet de caractériser le comportement de la réparation. Il se peut en effet qu'aucune baisse significative d'adhérence ne soit mesurée alors que de la fissuration préjudiciable à la durabilité de la structure soit observée. C'est un aspect qui a été encore peu étudié.

3.3.2.1 Profondeur de fissuration et incidence du fluage

Dans les problèmes avec de forts gradients de déformation, comme les problèmes de fissuration de séchage, la fissuration est initiée rapidement en peau et peut se propager profondément même si l'ouverture reste faible. Une étude numérique du comportement au séchage de réparations en béton (Bernard et coll., 1998) montre que la fissuration due au retrait peut atteindre l'interface après seulement 500 heures de séchage à 70% d'humidité relative lorsque celle-ci est située en deçà de

70 mm (Figure 3.8). Cette profondeur de fissuration semble fortement influencée par le potentiel de fluage du matériau de réparation (Bisonnette, 1996)(Bernard, 2000). Il est ainsi possible qu'il existe un bilan fluage/retrait tel que la fissuration ne se rende jamais jusqu'à l'interface (Figure 3.9).

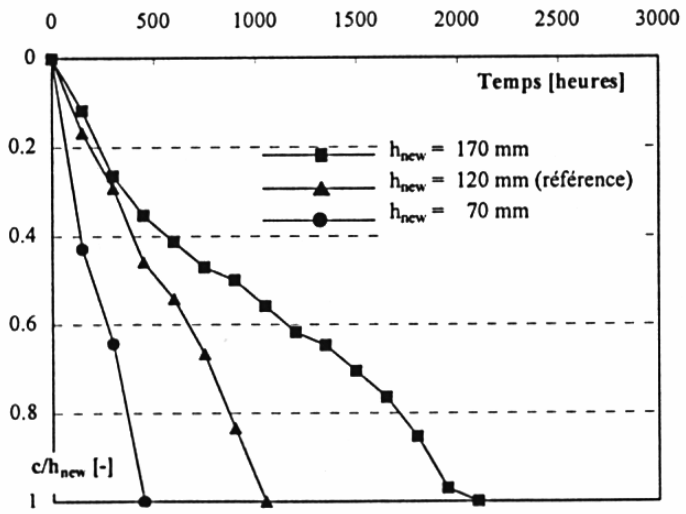


Figure 3.8: Figure 3.8: Profondeur de fissuration c en fonction du temps (h_{new}: épaisseur de la réparation en mm) pour H.R.=70% et T=20°C. Béton de résistance en traction f_t=2.5 MPa et de module d'élasticité 34 GPa (d'après Bernard et coll., 1998)

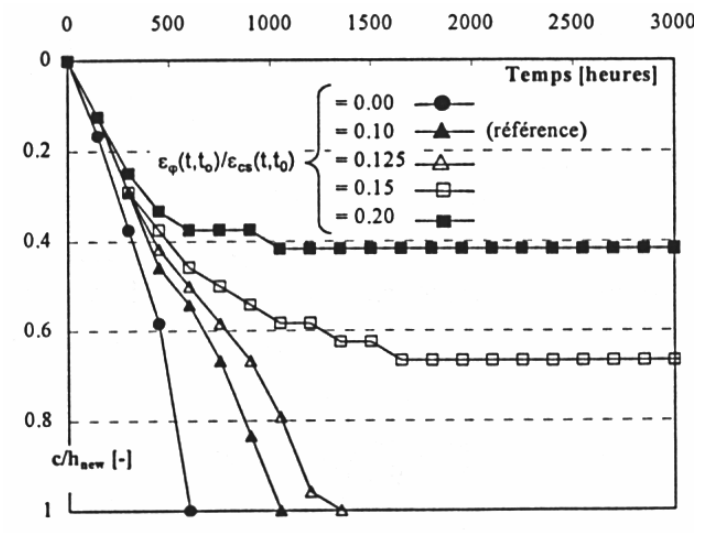


Figure 3.9: Figure 3.9: Influence du fluage sur la profondeur de fissuration ($\varepsilon_\phi(t,t_0)/\varepsilon_{cs}(t,t_0)$: rapport fluage spécifique sur retrait) (d'après Bernard et coll., 2000)

Bien sûr si le fluage a un effet positif sur la profondeur de fissuration, il a aussi une influence sur l'ouverture des fissures. De la même façon qu'il tend à diminuer la profondeur de fissuration, il semble que le fluage permette de diminuer les ouvertures de fissures. Cela aura un effet positif sur la durabilité de la réparation face aux agressions chimiques ou tout simplement sur la capacité du matériau de réparation à empêcher la progression des ions chlores qui sont à l'origine de la corrosion des armatures dans les ouvrages.

Le fluage ne semble donc pas être en mesure d'empêcher totalement la fissuration due au retrait de séchage, mais il pourrait en revanche permettre un meilleur contrôle de l'ouverture et de la profondeur des fissures.

3.3.2.2 Mécanismes de décollement et de propagation à l'interface

Le mode de propagation de la fissuration dans une réparation en béton soumise au séchage est encore mal connu. Le mécanisme de propagation des fissures lorsqu'elles atteignent l'interface est pourtant un phénomène majeur pour la durabilité des réparations. En effet, nous ne savons pas si les fissures, lorsqu'elles atteignent l'interface, vont se propager dans le support ou bien si elles vont se propager le long de l'interface et ainsi provoquer le décollement de la réparation. Peu d'études traitent de cet aspect du comportement mécanique des réparations en béton et la majorité d'entre elles sont des études numériques, comportant des hypothèses selon les modèles numériques mis en œuvre.

Il semble que, dans le cas de fissuration de séchage, la valeur de l'adhérence entre la réparation et son support soit déterminante sur le mécanisme de propagation des fissures au niveau de l'interface (Sadouki et coll., 1997)(Bernard et coll., 2000). En effet, il est possible qu'une adhérence minimale existe, en dessous de laquelle les fissures de retrait se propageraient le long de l'interface en décollant la réparation, alors qu'au-dessus de cette valeur critique, les fissures se propageraient dans le support (Figure 3.10).

Considérons le cas simplifié d'une poutre réparée séchant par une seule face parallèle à l'interface entre la réparation et le support. Dans le cas d'un chargement uniquement hygrothermique, les contraintes de retrait empêché sont orientées perpendiculairement à la direction de séchage, c'est à dire parallèlement à l'interface dans notre cas. Pour provoquer le décollement de la réparation ou pour générer de la fissuration le long de l'interface, il faudrait que les contraintes normales soient perpendiculaires à l'interface. Seules des conditions limites particulières peuvent faire en sorte que l'orientation des contraintes normales soit modifiée et devienne telle que l'interface se trouve sollicitée en traction. Ces conditions limites sont d'une part les zones de régularisation des contraintes que sont les extrémités de la poutre (Figure 3.11), mais d'autre part les pointes de fissure (Figure 3.13).

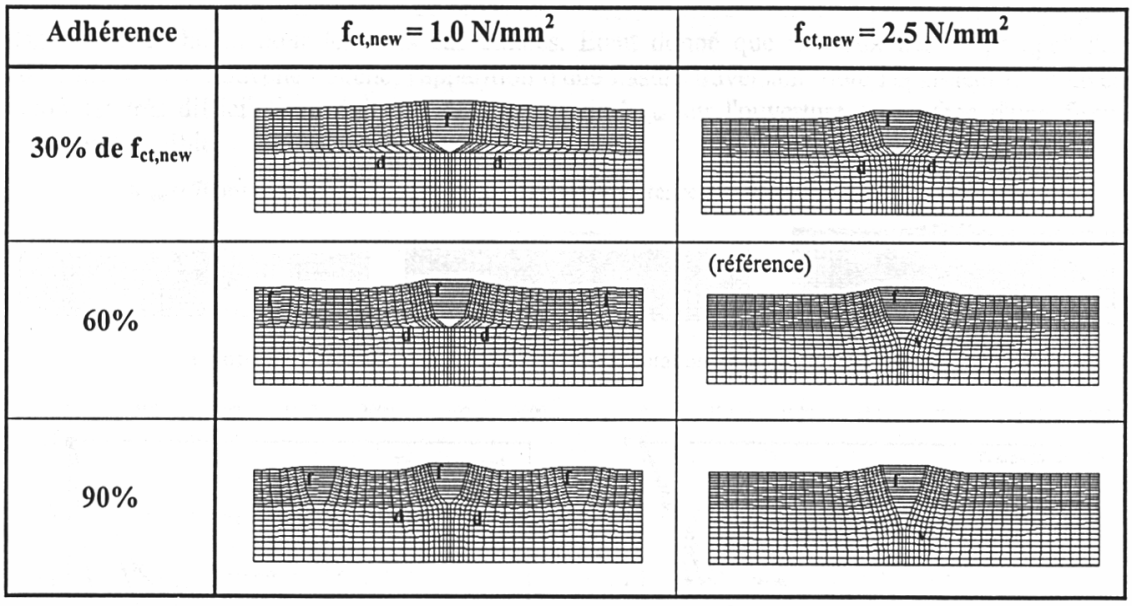


Figure 3.10: Mode de fissuration au niveau de l'interface selon la valeur de l'adhérence. Seuls le cas de référence et le cas dont l'adhérence vaut 90% de 2,5 MPa ne présentent aucun décollement (d'après Bernard et coll., 1998)

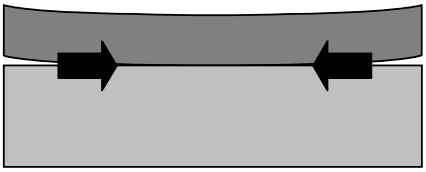


Figure 3.11: Figure 3.11: Décollement dans les zones de régularisation aux extrémités d'un élément réparé

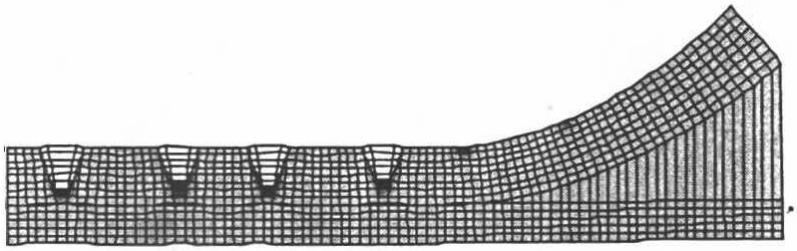


Figure 3.12: Figure 3.12: Décollement dans les zones de régularisation (d'après Kabele et coll., 1999)

Dans le cas d'un début de délamination dans les zones de régularisation aux extrémités de la poutre, nous ne savons pas si celle-ci peut se propager le long de l'interface et provoquer le décollement total de la couche de réparation ou si elle se stabilise une fois propagée suffisamment loin des bords Figure (3.12).

En pointe de fissure, les conditions limites « locales » pourraient également induire un décollement par propagation de fissures le long de l'interface. En effet, lorsqu'une fissure se propage jusqu'à l'interface, une poursuite du séchage peut induire un tuilage de la réparation entre deux fissures et ainsi générer des contraintes perpendiculaires à l'interface de la même façon qu'aux extrémités de la poutre (Figure 3.13). Un décollement pourra alors survenir tout dépendant de l'espacement des fissures et de l'épaisseur de la réparation et bien sur de la résistance du collage entre les deux matériaux.

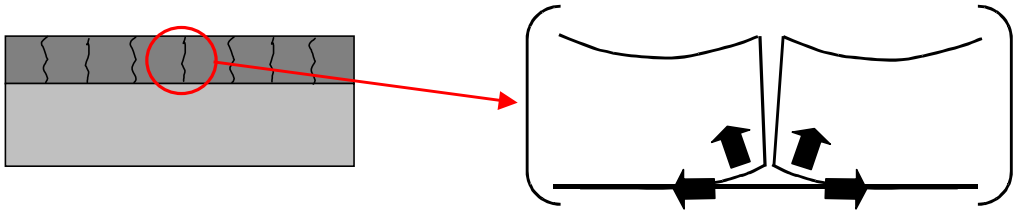


Figure 3.13: Décollement par tuilage en pointe de fissure

Le décollement de la réparation dans les zones de régularisation a été observé expérimentalement à plusieurs reprises (Bernard, 2000). En revanche, le second mécanisme de décollement par tuilage entre deux fissures n'a pas encore été observé expérimentalement et demeure pour l'instant une hypothèse qui reste à vérifier.

CHAPITRE 4

OBJECTIFS ET MÉTHODOLOGIE DU PROJET DE RECHERCHE

Ce chapitre décrit les objectifs du projet de recherche et la méthodologie adoptée pour y répondre. Un exposé détaillé des objectifs fixés est tout d'abord réalisé puis le programme de recherche est décrit dans son ensemble. Dans ce cadre, les paramètres de l'étude sont présentés ainsi que les différents essais et techniques employés ou mis en œuvre lors de la réalisation du projet.

4.1 CONTEXTE GENERAL DU PROJET

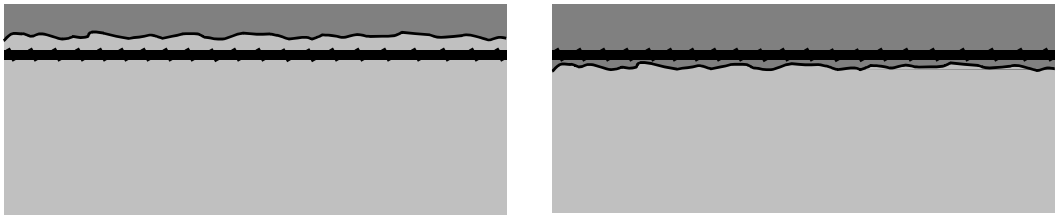
Actuellement, les réparations constituent un important problème en génie civil. En effet de nombreux ouvrages en béton nécessitent des réparations, que ce soit des trottoirs, des routes, des tabliers ou des piliers de ponts. Les maîtres d'ouvrages sont donc confrontés à un important problème aussi bien financier que technique. Il s'agit d'un problème financier car le volume d'ouvrage nécessitant des réparations est important. Par exemple selon une étude récente, sur 22000 pont recensés aux États Unis, 17000 requièrent des réparations (Montagnon, 1999). Cela constitue également un problème technique car il faut réaliser des réparations rapides à mettre en œuvre et avec un coût minimum, mais aussi des réparations durables. Ce problème nécessite donc de développer à la fois de nouvelles techniques de réparation, comme le béton projeté ou le béton autonivelant, mais également de mieux comprendre la problématique générale des réparations en béton afin de concevoir des matériaux qui soient les mieux adaptés possible.

Dans ce contexte, le Centre de recherche interuniversitaire sur le béton de l'Université Laval à Québec mène des recherches dans le domaine des réparations depuis environ 10 ans. Les principaux sujets de recherche ont porté jusqu'à maintenant sur les thèmes suivants :

- Les techniques de préparations de surface et leur incidence sur l'adhérence de la réparation à son support.
- L'influence de l'état hydrique du support au moment de la mise en place de la réparation sur l'adhérence développée.
- L'effet délétère du séchage sur la durabilité de l'adhérence entre le support et le matériau de réparation.
- La capacité d'adaptation par fluage des matériaux de réparation.

Actuellement, plusieurs projets de recherche sont en cours sur la problématique des réparations. La plupart s'insèrent dans le cadre de la Chaire industrielle sur le béton projeté et les réparations en béton de l'Université Laval. Ce sont notamment des projets visant l'étude du comportement mécanique des réparations sous chargement statique et différé, ainsi que l'étude du comportement des réparations sous sollicitation dynamique.

Le présent projet de recherche s'intéresse pour sa part au comportement sous chargement hydrique des réparations minces en béton. Le terme « réparation mince » fait référence au travail de réfection superficiel qui consiste à restaurer la surface d'un ouvrage en ajoutant une couche de béton non armée après en avoir dégagé la partie endommagée (Figure 4.1). L'épaisseur d'une réparation mince est de l'ordre de 50 à 100 mm. Une réparation mince diffère donc d'une reconstruction partielle qui est parfois envisagée pour certains ouvrages pour lesquels l'endommagement est tel que la capacité structurale est affectée.



armature non dégagée armature dégagée

Figure 4.1: Schématisation d'une réparation mince avec armature exposée ou non

4.2 OBJECTIFS

L'objectif global du projet n'est pas de développer de nouveaux matériaux de réparation ni de nouvelles techniques de réparation, mais plutôt d'améliorer la compréhension du comportement couplé hygro-mécanique des réparations minces en béton en l'absence de charge extérieure.

Selon une étude antérieure, le séchage est en effet un des principaux facteurs de détérioration de l'adhérence entre une réparation et son support (Saucier, 1990). Nous ne savons toutefois pas dans quelle mesure ni sous quelles conditions le séchage peut provoquer la fissuration et/ou le décollement d'une réparation mince en béton. En outre, nous ne savons pas comment la fissuration initiée en surface par le séchage va se développer ni comment elle va se propager lorsqu'elle atteint l'interface entre la réparation et le support. Pourra-t-elle induire le décollement de la couche de réparation ou se propagera-t-elle simplement dans le support ?

Le principal objectif de ce projet de recherche est donc de comprendre le comportement mécanique ainsi que les mécanismes de fissuration et de décollement d'une réparation mince en béton soumise à un chargement hygrothermique.

Jusqu'à présent de nombreux travaux de recherche se sont consacrées à l'étude de l'adhérence entre une réparation et son support ou à la durabilité de cette adhérence. En revanche peu d'études ont abordé le problème de la fissuration due au retrait empêché dans les réparations en béton.

Un autre aspect original du projet de recherche est d'étudier le comportement mécanique des réparations minces en béton sur des corps d'épreuve de grande dimension exposés dans des conditions réelles de température et d'humidité. Il est en effet paru nécessaire de transposer à grande échelle et en conditions réelles d'exposition les travaux de recherche effectués jusqu'à présent en laboratoire et sur des éprouvettes de petites dimensions. Outre l'effet du séchage, une étude in situ permettra également d'étudier l'effet des cycles de mouillage-

séchage sur le comportement mécanique d'une réparation mince en béton. Il est en effet envisageable qu'il existe une épaisseur critique existe au delà de laquelle l'interface se trouve peu ou pas soumise au séchage.

4.3 METHODOLOGIE

Afin de répondre aux objectifs fixés, différents outils ont été utilisés. Le programme de recherche mis au point dans le cadre de ce travail de doctorat repose en effet sur la complémentarité de l'approche expérimentale et de l'approche numérique. Le programme de recherche établi comporte donc une partie expérimentale et une partie de modélisation numérique dont les résultats combinés permettront de mieux comprendre le comportement mécanique des réparations minces sous chargement hydrique.

4.3.1 Étude in situ du comportement des réparations minces en béton sous chargement hygrothermique

La partie expérimentale du projet consiste essentiellement en une étude in situ du comportement des réparations minces en béton sous chargement hygrothermique. Cette étude est elle-même divisée en deux parties. En effet, outre la réalisation de réparations minces in situ, différents essais ont été effectués en laboratoire afin d'améliorer la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu, mais aussi afin d'améliorer l'analyse du comportement des réparations in situ. Les variables de cette étude in situ sont la longueur de la réparation, l'épaisseur de la réparation et la formulation du matériau de réparation utilisé.

4.3.1.1 Confection des supports en béton armé

En premier lieu, une série de supports en béton armé ont été confectionnés (figure 4.2). La géométrie de ces supports ainsi que le renforcement d'acier ont été choisis afin de conférer aux supports la plus grande rigidité possible tout en restant proche de ce qui est réalisé en pratique dans le domaine des réparations en béton, qu'il s'agisse par exemple de trottoir en béton, de poutres en béton

armé ou encore de surfaces de pilier de pont. Ces supports ont une section de 400x600 mm. 48 de ces supports sont d'une longueur de 2 m et 12 sont d'une longueur de 4 m. Ils comportent un renforcement supérieur et un renforcement inférieur composés de 3 barres d'acier d'armature 20M. Les supports comportent également des étriers 10M espacés régulièrement (4 pour les supports de 2 m et 8 pour les supports de 4 m) comme le montre la figure 4.3. Après leur confection au cours de l'été 1998, les supports ont vieilli pendant 1 an sur le site de l'usine Béton Québec au nord de Québec.

4.3.1.2 Procédure de réparation

Suite à la période de conditionnement, la surface supérieure des supports a été préparée de façon à recevoir les réparations. Afin de reproduire les conditions de chantier et dans le but de minimiser la fissuration résiduelle, la surface des supports a été préparée avec un marteau pneumatique de faible énergie. Un nettoyage au jet de sable et au jet d'air à haute pression ont par la suite été utilisés de façon à supprimer le plus possible les défauts et les particules lâches. Une épaisseur d'environ 30 mm a ainsi été enlevée sans toutefois dégager les armatures présentes dans les supports (figure 4.4). Ce type de préparation de surface favorise la création d'une macrorugosité importante. La figure 4.5 présente les variations moyennes de hauteur, selon la position dans la longueur, mesurées par rapport à un point de référence situé à l'extrémité des poutres. Les résultats montrent que la rugosité obtenue a une amplitude moyenne de 4 mm et une amplitude maximale de 12 mm.

Enfin, pendant les deux jours qui ont précédé la mise en place des matériaux de réparations, la surface des supports a été arrosée périodiquement de façon à se placer en condition saturée-surface sèche. Il semble en effet que cet état hydrique de surface soit la condition optimale pour l'obtention d'une bonne adhérence (Saucier, 1990).

Les matériaux de réparation ont été fabriqués à l'usine Démix-Béton Québec et acheminés par camion toupie jusqu'au site d'entreposage des supports situé à une centaine de mètres. Une fois le matériau mis en place, celui-ci a subi une

vibration à l'aiguille vibrante de façon à assurer le meilleur contact possible avec le support et de façon à éviter les vides de compaction. Dès la mise en place des réparations, une cure à l'eau et une protection contre le séchage ont été appliqués pendant 3 jours à l'aide d'un géotextile maintenu humide et d'une bâche en plastique. À l'issue de cette période de mûrissement, les réparations ont été exposées aux conditions de température et d'humidité extérieures.

Figure 4.2: Support en béton armé de section 400x600 mm et de longueur 2 m sur le site d'exposition à Québec

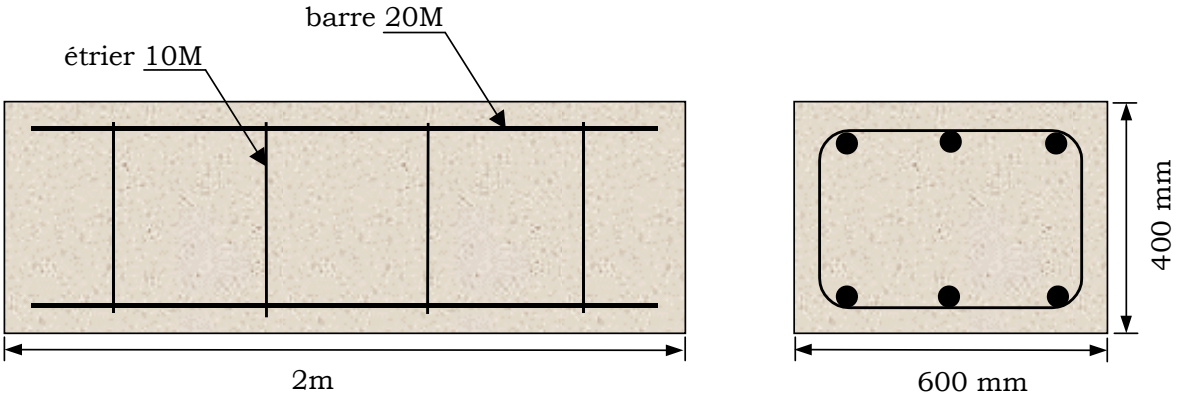


Figure 4.3: Géométrie des supports de 2 m et caractéristiques du renforcement en acier

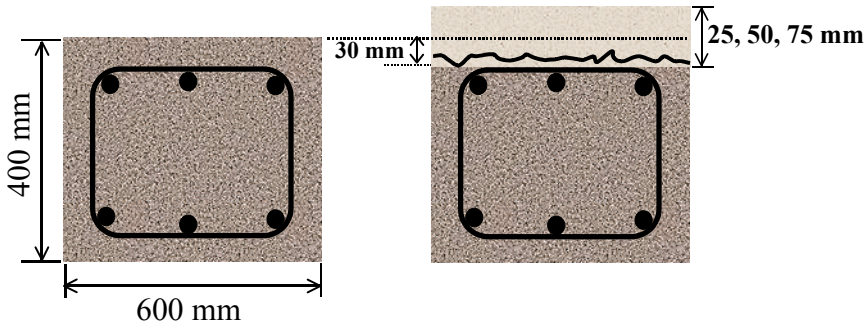


Figure 4.4: Procédure de réparation

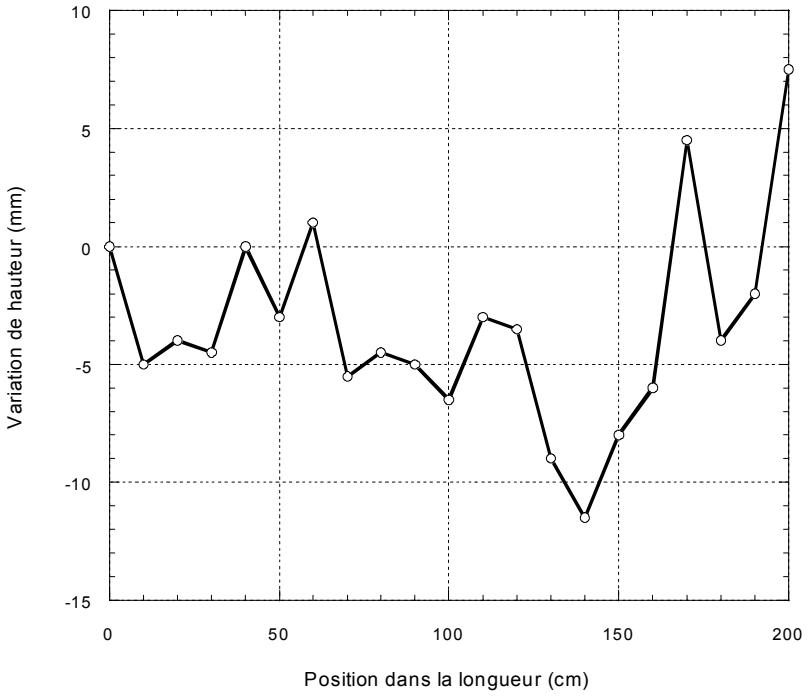


Figure 4.5: Variation moyenne de hauteur par rapport à un point de référence pour les poutres de longueur 2 m

4.3.1.3 Paramètres de l'étude in situ

Outre le temps, l'étude comportait 3 variables principales : la longueur de réparation, l'épaisseur de recouvrement et la formulation du matériau de réparation.

- *Longueur des réparations*

Deux longueurs de réparation ont été retenues, à savoir 2 m et 4 m. Au commencement du projet, seules des réparations d'une longueur de 2 mètres étaient prévues. Toutefois, afin de vérifier l'influence du degré de restriction effectif du support, il a été décidé de réaliser des réparations avec une longueur plus importante. La seconde longueur de réparation retenue est de 4 mètres.

- *Épaisseur des réparations*

Les épaisseurs de recouvrement retenues sont 25 mm, 50 mm et 75 mm. L'objectif était de couvrir une gamme d'épaisseur la plus large possible, tout en restant dans le domaine de ce que l'on peut qualifier de réparations minces (à savoir entre 50 et 100 mm). Le choix de descendre en-dessous des 50 mm (qui constitue généralement la limite inférieure) a été fait afin de vérifier l'existence possible d'un seuil dans le comportement des réparations minces soumises au séchage (Saucier et coll., 1996), la vitesse de séchage d'un élément étant d'autant plus grande que son épaisseur est faible.

- *Formulation des matériaux de réparation*

La formulation du matériau de réparation demeure l'un des paramètres clés gouvernant la durabilité d'une réparation. Les matériaux retenus couvrent une gamme, non pas exhaustive de ce qui est utilisé en pratique, mais qui permettra de mieux comprendre les mécanismes qui régissent la durabilité d'une réparation tout en se voulant représentative des bétons de chantier. La recherche du matériau développant la meilleure adhérence au support n'était pas un des objectifs de l'étude.

Le retrait de séchage est considéré comme étant l'un des principaux facteurs affectant la durabilité de l'adhérence entre une réparation et son support [Saucier, 1990). Les formulations ont donc été choisies afin de couvrir l'ensemble du spectre en ce qui a trait à l'intensité du retrait ultime des matériaux de réparation. Les 4 formulations retenues sont données dans le tableau 4.1. Elles ont été réalisées avec des granulats granitiques concassés d'un diamètre maximal de 10 mm et avec du sable 0-5 mm dont les propriétés et la granulométrie sont données dans le tableau 4.2 et 4.3.

Le béton ordinaire (BO) est un béton de réparation typique réalisé avec un ciment Portland ordinaire (compositions données dans le tableau 4.4) et ayant un rapport eau/ciment de 0,40. Il répond aux exigences de durabilité au gel-dégel et à l'écaillage spécifiques au climat du Québec. Le béton hautes performances (BHP) est un béton de rapport eau/ciment 0,29 réalisé avec un ciment Portland ordinaire contenant 8% de fumée de silice en masse (composition données dans le tableau 4.4). Il a été choisi comme le matériau qui développerait un retrait de séchage plus faible que les autres matériaux. Le mortier ordinaire (MO) est en fait le mortier du béton ordinaire. Il correspond au matériau qui développera de par son importante quantité de pâte, les déformations de retrait les plus importantes. Il s'agit donc d'un matériau vraisemblablement propice à la fissuration en situation de retrait empêché. Enfin, le mortier fibré (MF) est en fait le mortier ordinaire renforcé de macrofibres d'acier à crochet (longueur 30 mm et diamètre 0,5 mm). Afin de ne pas perturber le squelette granulaire, un volume de sable équivalent au volume de fibres introduit a été enlevé au mortier ordinaire pour réaliser le mortier fibré. Ce matériau a été choisi afin de vérifier le rôle que peuvent jouer les fibres d'acier en situation de retrait empêché sur un matériau dont le retrait est important.

La teneur en air des matériaux, donnée dans le tableau 4.1, correspond à une teneur en air mesurée sur matériau non durci. Il faut remarquer que la teneur en air des deux mortiers est, comme souhaité pour tenir compte du volume de pâte plus important, plus élevée que le 5-7% recommandé par la norme canadienne CSA Standard A23.1-94 pour les bétons ordinaires.

Tableau 4.1: Compositions des matériaux de réparation

	BO	BHP	MO	MF
Ciment (kg/m^3)	392	500	622	631
Eau (l/m^3)	159	146	251	253
Sable 0-5 mm (kg/m^3)	752	744	1228	1210
Granulats 5-10 mm (kg/m^3)	938	869	0	0
Superplastifiant (l/m^3)	2,35	4,94	0	0
AEA (ml/kg de ciment)	0,20	0,30	0,14	0,21
Fibres d'acier 30/0.50 (kg/m^3)	0	0	0	80
E/C	0,40	0,29	0,40	0,40
Affaissement (mm)	115	185	180	120
Teneur en air (%)	7,8	7,4	9,5	9,5

Tableau 4.2: Propriétés et granulométrie du sable

Propriétés	
densité brute à sec	2,65
absorptivité (%)	0,60
module de finesse	2,48

Tamis	Masse retenue (%)
9,5 mm	-
4,8 mm	3,4
2,4 mm	4,9
1,2 mm	11,4
600 µm	27,6
300 µm	29,4
150 µm	15,5
75 µm	4,3

Tableau 4.3: Propriétés et granulométrie de la pierre

Propriétés	
densité brute à sec	2,58
absorptivité (%)	1,19

Tamis	Masse retenue (%)
12,7 mm	0,8
9,5 mm	0,8
4,8 mm	86,0
2,4 mm	11,5
1,2 mm	-

Tableau 4.4: Composition en oxyde (%) des ciments utilisés

Oxyde	Type 10	Type HSF
$Si0_2$	20,10	28,10
Al_2O_3	4,14	3,32
Fe_2O_3	2,74	3,72
CaO	62,00	56,60
MgO	1,93	1,46
SO_3	3,05	2,16
K_2O	0,83	0,73
Na_2O	0,27	0,29
C_3S	59	-
C_2S	13	-
C_3A	6	-
C_4AF	8	-

4.3.1.4 Programme expérimental

La première partie du programme expérimental a consisté en la caractérisation complète des différentes propriétés des matériaux de réparation. Dans une seconde partie, il s'agissait de réaliser un suivi de l'adhérence entre les réparations et leur support de façon à en quantifier la durabilité sous l'effet du chargement hygrothermique. En parallèle au suivi de l'adhérence, un suivi de la fissuration de surface et de la fissuration interne a été réalisé. Le comportement hygrothermique des réparations a également été suivi in situ par des mesures de perte de masse et de déformation.

- *Caractérisation des matériaux de réparation en laboratoire*

Pour la caractérisation des matériaux de réparation, différents essais ont été effectués. Des essais de compression, des essais de traction par fendage et des essais de module d'élasticité ont été réalisés aux échéances de 7 jours, 14 jours, 28 jours et 90 jours après la confection des mélanges. Les éprouvettes testées sont des cylindres moulés de

diamètre 100 mm et de hauteur 200 mm mûris 24 heures sur le site d'exposition des réparations et conservés dans une chambre humide jusqu'à échéance.

Afin d'évaluer la capacité du mortier fibré à contrôler la fissuration, des essais de flexion quatre points ont été réalisés sur ce matériau (Figure 4.5). Pour déterminer l'apport bénéfique des fibres, les mêmes essais ont été menés sur le mortier ordinaire. Les éprouvettes utilisées sont des plaques de section 50x100 mm et de 400 mm de longueur. Ces dimensions ont été choisies de façon à se placer dans les conditions géométriques les plus proches de celles des réparations in situ. Avec une telle épaisseur d'éprouvette, une orientation préférentielle des fibres représentative de celle que l'on rencontre sur les réparations in situ est également obtenue. Un extensomètre inductif du type LVDT a été utilisé pou mesurer la déflexion au centre de l'éprouvette entre la fibre supérieure et un cadre rigide articulé positionné à la hauteur de l'axe neutre.

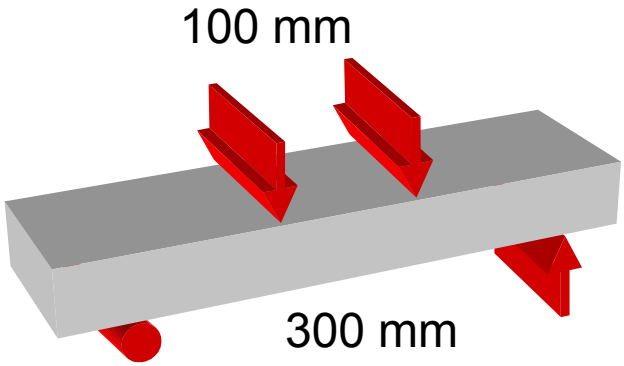


Figure 4.6: Dispositif expérimental de l'essai de flexion 4 points

Des essais de retrait endogène et de séchage ont également été effectués sur les matériaux de réparation. Les éprouvettes sont des prismes de dimensions 100x100x400 mm (essai ASTM C157). Des jauges Demec ont été collées en surface pour la mesure des déformations. Pour les déformations de retrait endogène, les éprouvettes ont été scellées avec deux couches de papier aluminium adhésif et conservées dans une chambre à température contrôlée à 23°C. Les mesures ont débuté après une cure humide de 24 heures. Les éprouvettes de retrait de séchage ont été conservées dans une chambre à température et humidité contrôlées (23°C, H.R.=50%).

Les mesures ont débuté après 3 jours de cure humide afin de reproduire le même mûrissement que celui appliqué aux réparations in situ.

Afin de quantifier le dégagement de chaleur dû à l'hydratation, des essais de calorimétrie quasi-adiabatique ont été réalisés sur chacun des matériaux. Cet essai consiste à mesurer la température au centre d'une éprouvette cylindrique (150x300 mm) isolée de l'extérieur. Cet essai a servi principalement à la calibration des lois d'évolution du degré d'hydratation en fonction du temps qui ont servi à l'étude numérique du risque de fissuration au jeune âge des réparations minces en béton (cf. Chapitre 10).

- *Caractérisation de l'adhérence des réparations in situ*

Afin d'évaluer l'adhérence développée entre la réparation et son support, deux types d'essais ont été effectués. Le premier est un essai classique d'arrachement (« pulloff strength test »). Il consiste à réaliser un essai de traction sur une carotte non extraite de son support (figure 4.6). Il s'agit d'un essai de traction rotulé. La charge est appliquée par le biais d'un piston actionné par une pompe à huile manuelle. L'essai n'est donc pas contrôlé, ni en vitesse de déplacement du piston ni en vitesse de charge.

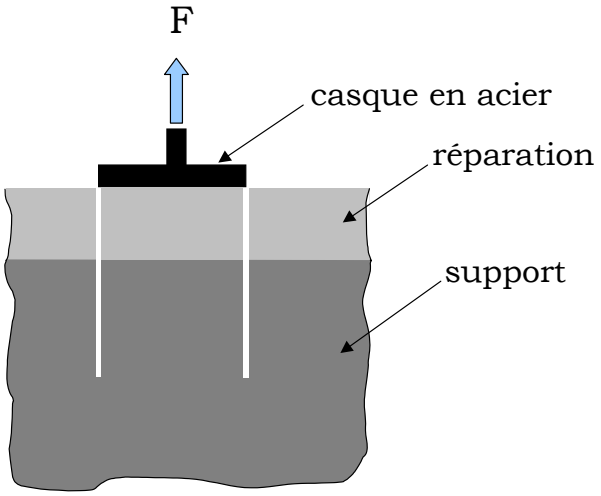


Figure 4.7: Principe de l'essai d'arrachement in situ

Les résultats obtenus avec l'essai d'arrachement affichent une variabilité importante et le plan de rupture ne se trouve pas toujours au niveau de l'interface entre les deux matériaux. En effet, il est parfois difficile de carotter de façon rectiligne et, en

conséquence, l'alignement de l'axe de charge est rendu délicat. C'est pourquoi, malgré la présence de la rotule qui vient en principe corriger les défauts de parallélisme ou d'alignement, il peut subsister une flexion parasite provoquant une rupture dans un plan qui ne correspond pas forcément au plan le plus faible de l'éprouvette. La résistance de la liaison entre la réparation et le support peut alors être biaisée. Nous avons donc jugé que cet essai n'était pas suffisant pour quantifier de façon stricte et fiable l'adhérence d'un matériau de réparation à son support. C'est pourquoi un essai de traction directe a été développé afin de mieux répondre à nos exigences.

L'essai de traction directe est effectué sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 100 mm et de hauteur 200 mm carottées au-delà de l'interface et extraites des poutres réparées. Les éprouvettes sont surfacées afin de corriger les défauts de parallélisme entre les faces et pour ajuster l'élancement de l'éprouvette à une valeur s'approchant de 2. L'essai est non pas rotulé mais encastré. L'éprouvette est collée sur deux casques de traction cylindriques en aluminium à l'aide d'une colle à prise rapide et à haute résistance à base de méthacrylate (Figure 4.7). Afin de rendre le plus homogène possible les contraintes sur toute la hauteur de l'éprouvette, les dimensions des casques de traction et le matériau dont ils sont faits ont été soigneusement choisis. Des calculs par éléments finis ont montré que la forme géométrique optimale pour une meilleure répartition des contraintes dans l'éprouvette est un casque du même diamètre que celui de l'éprouvette et dont la hauteur est au moins égale à 1,5 fois son diamètre (AFREM, 1995). De plus, les casques de traction ont été fabriqués en aluminium, matériau dont le coefficient de poisson est quasi identique à celui du béton. Cela permet de réduire les problèmes de frettage et ainsi de diminuer les risques de rupture au niveau du plan de collage de l'éprouvette. L'essai, réalisé sur une presse hydraulique servo-contrôlée, est asservi en vitesse de charge à un taux de 1 MPa/minute.

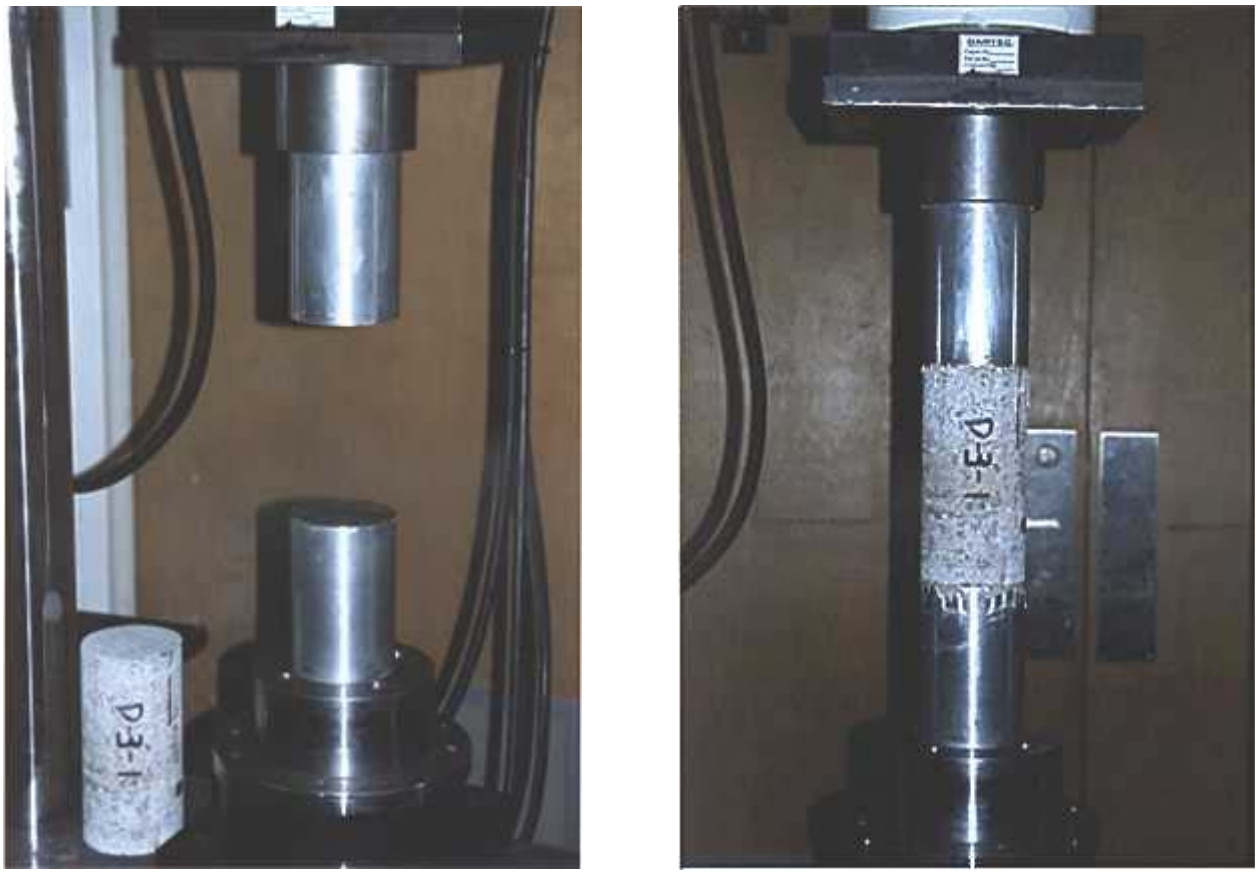


Figure 4.8: Dispositif de l'essai de traction directe mis au point

- *Suivi du comportement hygrothermique des réparations in situ*

Afin de mieux comprendre le comportement mécanique des réparations in situ et en particulier afin de comprendre leur mode d'endommagement ou de fissuration sous chargement hydrique, leur comportement hygrothermique a été suivi. Dans cet objectif, un suivi de la perte de masse due au séchage et des déformations qui en résultent a été réalisé sur les réparations in situ.

La température et l'humidité relative extérieures ont été enregistrées en continu sur le site d'exposition des réparations. Les capteurs utilisés ont une gamme d'utilisation en température de –30^{0}C/+50^{0}C (précision $^+/_-$ 0,2^{0}C) et en humidité relative de 0-100% (précision $^+/_-$3%). Ces capteurs

sont spécialement conçus pour des mesures en extérieur et sont isolés dans un boîtier étanche.

Afin de suivre le transfert d'humidité dans les matériaux de réparation sous l'effet du séchage et des cycles de mouillage-séchage, des mesures de perte de masse dynamique ont été réalisées par la « méthode des tranches » (Sakata, 1983). Cette méthode consiste en effet à suivre l'évolution dans le temps de la masse de tranches de béton d'épaisseur croissante et de même section, coupées à partir d'une même éprouvette. Les tranches sont scellées sur 5 de leurs 6 faces afin d'obtenir un séchage unidirectionnel (figure 4.8). Dans la mesure où la section transversale de chacune des tranches est la même, on fait l'hypothèse que l'humidité à une distance donnée de la surface de séchage est la même quelle que soit l'épaisseur de la tranche. Connaissant la perte de masse dans le temps de chaque tranche successive, leur teneur en eau moyenne peut donc être calculée. Par recoupement entre les différentes tranches, il est alors possible de reconstituer le profil de teneur en eau d'une éprouvette dont l'épaisseur correspond à la somme des épaisseurs des différentes tranches. Dans notre cas, cet d'essai a permis d'évaluer l'importance du séchage dans les réparations et de déterminer de façon approximative la profondeur d'action des cycles de mouillage-séchage auxquels sont soumises les réparations. Les tranches utilisées ont une section de 10x10 cm et une épaisseur variant de 10 mm à 70 mm par saut de 10 mm. Les faces latérales et la face inférieure on été scellées avec un enduit à base de résine époxydique afin d'obtenir un séchage unidirectionnel.

Figure 4.9: Vue des tranches des matériaux de réparation utilisés pour le suivi de masse in situ

La teneur en eau des plaques est déterminée, à chaque échéance, à partir de la connaissance de leur masse initiale à saturation, de leur masse sèche après étuvage à 105°C et de leur volume (équation 1)

$$C(t) = \frac{M_{eau_totale} + \Delta m(t)}{V} \qquad (1)$$

où :

M_{eau_totale} est la quantité d'eau de la plaque à saturation (kg)

$\Delta m(t)$ est la variation de masse à un instant t (kg)

V est le volume de la plaque (m^3)

En parallèle, les déformations hygrothermiques des matériaux de réparation ont été mesurées in situ. Des plots du type jauges Demec ont pour cela été fixés à 2 endroits sur 1 des faces latérales des réparations lors de leur mise en place (Figure 4.9). Au Chapitre 6, où sont présentés les résultats de ces mesures, nous ferons référence aux positions des paires de plots sous la dénomination "position 1" et "position 2".

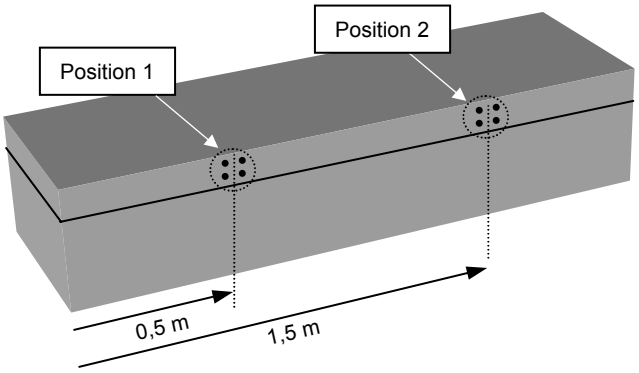


Figure 4.10: Positions des paires de plots de mesure des déformations sur les réparations

Afin de mesurer les gradients de déformation, pour chaque position, 2 ou 3 paires de plots ont été disposées à différentes profondeurs, tel que mentionné dans le tableau 4.5. La base de mesure des plots était de 127 mm (5 pouces).

Tableau 4.5: Profondeur des paires plots depuis la surface des réparations suivant l'épaisseur de la réparation

Profondeur (mm)	Épaisseur de la réparation		
	25 mm	50 mm	75 mm
Paire 1	10	10	20
Paire 2	17	25	40
Paire 3	-	40	60

Afin d'accéder aux déformations libres des matériaux de réparation, des plaques faites des mêmes matériaux, avec les mêmes épaisseurs et séchant dans les mêmes conditions ont été fabriquées. Ces plaques ont une section de 1x1 m et des épaisseurs de 25 mm, 50 mm et 75 mm. Elles ont été scellées sur 5 de leur 6 faces pour reproduire le mieux possible les conditions d'échange hydrique des réparations. Elles sont également instrumentées avec des plots insérés lors de leur fabrication à la mi longueur de 2 de leur 4 faces et disposés en profondeur de façon identique aux réparations (Figure 4.10). Chacune des 2 faces instrumentées possède ainsi 2 ou 3 paires de plots suivant l'épaisseur de la plaque.

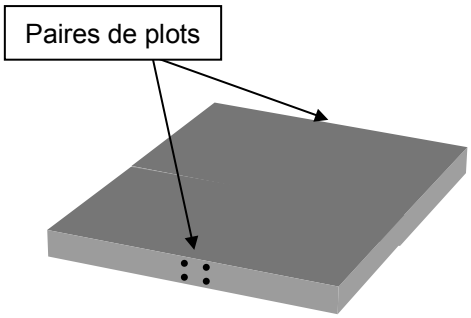


Figure 4.11: Instrumentation des plaques avec des paires de plots

- *Mesure de la fissuration de surface et de la fissuration interne des réparations in situ*

Dans le but d'étudier la fissuration due au retrait restreint, la fissuration des réparations in situ a été suivie de deux manières. La première a consisté à cartographier et à quantifier la fissuration de surface et la deuxième à analyser la fissuration interne sur des plaques sciées à partir de carottes prélevées dans les réparations. Ces deux types d'analyse de la fissuration devront nous permettre par recoupement de mieux expliquer les mécanismes de fissuration due au retrait restreint dans les réparations minces en béton.

La cartographie du réseau de fissures a été réalisée de façon à satisfaire les exigences d'une méthode mise au point au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées pour déterminer l'indice de fissuration des parements en béton[1]. Cette méthode consiste à tracer les fissures qui se trouvent à l'intérieur d'une fenêtre carrée de 40 cm de côté dans notre cas, disposée à un endroit représentatif de l'état de fissuration de surface du parement ou de la réparation. Chaque fissure qui intercepte un des côtés ou une des diagonales de cette fenêtre est de plus mesurée en ouverture (Figure 4.11). Cette méthode permet non seulement de cartographier le réseau de fissures, mais aussi de quantifier la fissuration, soit par un calcul

[1] Techniques et méthodes des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Méthode d'essai n°47, "Détermination de l'indice de fissuration d'un parement de béton"

d'ouverture moyenne de fissure ou par le calcul d'un indice de fissuration. En effet, sur ces relevés de fissures, aucune distinction n'est faite entre les différentes ouvertures de fissure, puisqu'elles sont toutes représentées avec la même grosseur de trait. Un relevé de fissure seul ne permet donc pas de juger de la densité de fissuration. C'est dans ce but que l'indice de fissuration est déterminée pour chaque réparation. Cet indice de fissuration est la moyenne, sur le nombre de côtés, de la somme des ouvertures de fissures pour chaque côté rapporté à sa longueur (équation 2), c'est à dire une longueur fissurée sur une longueur totale. L'indice de fissuration représente donc une ouverture moyenne de fissure par unité de longueur et est exprimé en µm/m. Il correspond donc à une quantification linéique de la densité de fissuration d'une surface.

Pour la mesure des ouvertures de fissure en surface des réparations, un oculaire de grossissement 10x gradué au 10µm a été utilisé. Cet instrument permet de mesurer des ouvertures de fissures avec une précision de +/- 5µm. L'espacement entre les fissures a également été mesuré sur les faces latérales des réparations de façon à avoir une base de mesure plus grande pour ce paramètre.

$$I.F. = \frac{\sum_{j=1}^{6} \left(\frac{\sum_{i} \omega_i}{d} \right)_j}{n} \qquad (2)$$

avec:

ω_i l'ouverture en µm de la fissure i

d la longueur du côté ou de la diagonale

n le nombre d'axe de mesure (dans notre cas 6)

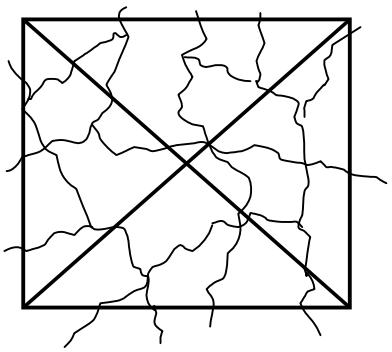


Figure 4.12: Principe de la méthode de cartographie et de mesure du réseau de fissures en surface des réparations

L'étude de la fissuration interne est le fruit d'une collaboration avec le Laboratoire d'étude et de recherche sur les matériaux d'Arles en France. La technique employée est la technique des répliques. Cette technique consiste à prendre une empreinte d'une section d'un échantillon de matériau où se trouve potentiellement des fissures et à l'observer, après métallisation, au microscope électronique à balayage. Les empreintes sont obtenues par application d'un film plastique qui prend la forme de la surface sur laquelle il a été déposé grâce à un solvant vaporisé au préalable sur l'échantillon. La technique des répliques est une méthode très efficace pour l'observation d'une fissuration non diffuse et sur de petites surfaces. L'utilisation du microscope électronique permet en outre l'observation des fissures les plus fines.

Pour l'application de cette technique à l'observation de la fissuration interne des réparations, des prélèvements ont été réalisés au droit des fissures en surface des réparations. Ces prélèvements ont ensuite été sciés de façon à obtenir des plaques de 10 cm de largeur et de longueur suffisante pour observer l'ensemble de la réparation, la zone d'interface et une partie du support. Avant la prise de l'empreinte, la surface des plaques a été polie à l'aide d'une pâte diamantée.

4.3.2 Étude de la capacité d'adaptation par fluage des matériaux de réparation

La capacité d'adaptation par fluage des matériaux leur permet, en situation de retrait restreint, de relaxer une partie des contraintes et ainsi de diminuer les risques de fissuration, de retarder l'apparition des fissures ou encore d'en ralentir le développement (Bissonnette, 1996)(Bernard et coll., 1998).

Le fluage en compression est une propriété des matériaux cimentaires qui a été beaucoup étudiée car elle est l'origine de nombreux problèmes en génie civil comme les pertes de précontraintes ou l'apparition de déformations excessives. Récemment, l'étude du fluage en traction des bétons a été abordée par (Bissonnette,1996) dans le cadre d'une étude sur la capacité d'adaptation des matériaux en situation de retrait restreint. Il a été montré que l'un des paramètres principaux qui gouvernent la capacité d'adaptation est le bilan, exprimé sous forme de ratio, des déformations de retrait et de fluage spécifique. Celui-ci est non constant au début de l'essai mais tend rapidement vers une valeur asymptotique qui exprime la capacité du matériau à relaxer les contraintes générées par le retrait empêché.

Dans le cadre de cette étude, nous avons souhaité caractériser la capacité d'adaptation des matériaux de réparation utilisés in situ et donc de quantifier leur rapport fluage/retrait. Corrélée à l'étude de la fissuration, cette caractérisation nous permettra de mieux comprendre le comportement mécanique observé in situ.

Dans cet objectif, des essais de fluage en traction ont été réalisés sur le banc de fluage en traction récemment développé par (Bissonnette,1996) à l'Université Laval. Ces essais étant menés en parallèle à des essais de retrait, ils permettent l'accès au bilan retrait-fluage du matériau testé. Une étude complète du fluage en traction a été conduite sur le béton ordinaire qui est le matériau de référence du projet de recherche. Des essais ont

pour cela été réalisés suivant 3 niveaux de charge, avec et sans échange d'humidité avec l'extérieur et à un âge du matériau de 7 jours. Par la suite, des séries essais moins exhaustives ont été effectués sur le mortier ordinaire, le mortier fibré et le béton à hautes performances (un seul niveau de charge, avec échange d'humidité et à un âge du matériau de 7 jours). Ces différents essais permettront de dresser un bilan du comportement différé en traction et de la compatibilité volumétrique des 4 matériaux de réparation utilisés in situ.

4.3.3 Étude numérique de la fissuration due au retrait restreint dans les réparations minces en béton

Afin de compléter les résultats issus de l'étude expérimentale in situ, la méthodologie élaborée pour ce projet comporte également une partie de modélisation numérique. Cette partie du programme de recherche a été réalisée au Laboratoire central des ponts et chaussées de Paris dans la division Bétons et composites cimentaires. Le code de calcul par éléments finis utilisé est le progiciel CESAR-LCPC.

La modélisation effectuée comporte trois parties. La première partie porte sur le risque de fissuration au jeune âge des réparations minces en béton. Dans cette partie, l'objectif est principalement d'évaluer les contraintes générées dans une réparation mince par le retrait endogène empêché. La seconde partie porte sur le séchage et les contraintes dues au séchage dans les réparations minces en béton. Dans cette seconde partie, un modèle de diffusion transitoire non linéaire a été utilisé pour simuler le transport de l'eau dans un système réparation-support sous l'effet du séchage. Ensuite le retrait de séchage ainsi que les contraintes qui en découlent dans la réparation ont été calculés afin de déterminer le risque de fissuration due au séchage dans une réparation mince en béton. Dans cette partie, l'effet du pompage de l'eau libre du matériau de réparation par le support a également été étudié. Enfin la troisième partie est une étude de la fissuration due au séchage dans les réparations minces en béton. Celle-ci a pour objectif d'étudier les mécanismes de propagation de

la fissuration dans un système réparation-support. Un modèle de fissuration probabiliste (Rossi et coll., 1991) a pour ce faire été couplé avec un modèle de diffusion transitoire non linéaire. Ce modèle permet l'accès à une cartographie complète des fissures dans la réparation et également à la mesure des ouvertures de fissure ainsi qu'à leur espacement. Il s'agit d'un modèle de fissuration bien adapté au problème traité dans le cadre de ce projet de recherche.

PARTIE II :

CARACTÉRISATION DES MATÉRIAUX DE RÉPARATION
ET
ÉTUDE EXPÉRIMENTALE IN SITU DU COMPORTEMENT HYGROMÉTRIQUE ET MÉCANIQUE DES RÉPARATIONS

CHAPITRE 5

CARACTÉRISATION DES PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX DE RÉPARATION UTILISÉS IN SITU

Ce chapitre présente les résultats des essais de caractérisation des différentes propriétés des matériaux de réparation utilisés in situ. Dans un premier temps, les propriétés mécaniques telles que la résistance en compression, la résistance en traction et le module d'élasticité sont présentées ainsi que leur évolution dans le temps. Ensuite, les résultats des essais de caractérisation des propriétés et phénomènes hygrométriques, tels que le retrait endogène, le retrait avec séchage et la perte de masse au séchage sont présentés. Enfin, ce chapitre présente les résultats des essais de fluage en traction réalisés sur les matériaux de réparation dans le but d'évaluer leur capacité d'adaptation en situation de déformations empêchées. Ces résultats ont non seulement servi comme paramètres d'entrée des simulations numériques conduites dans l'étude présentée dans la Partie III, aux Chapitres 9 à 11, mais ils ont également permis de mieux comprendre et interpréter le comportement des réparations réalisées in situ à grande échelle en conditions climatiques réelles.

5.1 PROPRIETES MECANIQUES

Les propriétés mécaniques des matériaux ont été mesurées sur des cylindres moulés de diamètre 100 mm et de hauteur 200 mm mûris 24 heures sur le site d'exposition des réparations et conservés dans une chambre humide jusqu'à échéance. Afin de déterminer l'évolution de ces propriétés, les différents essais ont été réalisés aux échéances de 7 jours, 14 jours, 28 jours et 90 jours après la confection des mélanges.

5.1.1 Résistance en compression

Les résultats des essais de compression sur les matériaux de réparation sont présentés dans le tableau 5.1 et sur la Figure 5.1. Dans ce tableau 5.1, la valeur à 28 jours pour le béton hautes performances correspond à la moyenne de 6 essais. En effet, les résultats obtenus sur les 3 éprouvettes initiales étant dispersés, les éprouvettes ayant servies à la détermination du module de Young ont été utilisées pour compléter les résultats des essais de compression. Malgré cela, l'écart-type pour cette série d'essais demeure élevé. Sur les courbes de la figure 5.1, les valeurs sont affectées d'un intervalle de confiance de niveau de probabilité 95%.

Comme le montre le tableau 5.1, hormis le béton hautes performances, les matériaux de réparation ont développé des résistances en compression de l'ordre de 35 à 40 MPa à 28 jours. Ces résistances correspondent à ce qui était attendu pour des bétons et mortiers à air entraîné réalisés en usine dans des conditions moins contrôlées qu'en laboratoire. Toutefois, les résistances en compression obtenues dans le cas du béton hautes performances, en particulier à 28 jours, sont faibles comparativement à ce qui était attendu pour cette classe de matériau. En effet, lors des gâchées de mise au point, une résistance à 28 jours de l'ordre de 70 MPa avait été obtenue. Toutefois, dans le cadre de cette étude sur la fissuration des réparations sous chargement hydrique, la résistance en compression n'est pas une propriété mécanique discriminante pour les matériaux car ce n'est pas elle qui gouverne le comportement mécanique du système.

La figure 5.1 montre que le béton hautes performances est non seulement le matériau dont la résistance en compression est la plus élevée, mais aussi qu'il s'agit du matériau dont la vitesse de développement de la résistance est la plus importante.

Tableau 5.1:Résistance en compression moyenne des matériaux de réparation

Matériau	Age du matériau (jours)	Nombre d'éprouvettes	Valeur moyenne (MPa)	Ecart-type (MPa)
MO	7	3	27,2	1,5
	28	3	38,9	3,4
MF	7	3	34,0	0,8
	28	3	39,6	0,8
BO	7	3	35,1	1,3
	28	3	40,2	1,2
BHP	7	3	48,2	1,4
	28	6	56,6	3,0

5.1.2 Résistance en traction par fendage

Les résultats des essais de traction par fendage sur les matériaux de réparation sont présentés dans le tableau 5.2 et sur la figure 5.2. Dans le tableau 5.2, pour le béton hautes performances, les résistances sont celles obtenues à 7 et 90 jours en raison de problèmes techniques survenus aux moments des essais à 28 jours. À nouveau sur les courbes de la figure 5.2, les valeurs sont affectées d'un intervalle de confiance au niveau de probabilité 95%.

Les résultats obtenus correspondent à ce qui était attendu pour les formulations de matériau utilisées. Il faut cependant garder une certaine réserve face aux résultats obtenus avec le mortier fibré. En effet, ce matériau est semblable au mortier ordinaire en ce qui concerne la qualité de la matrice cimentaire. Les résultats de traction devraient donc être similaires. Les valeurs plus élevées obtenues avec le mortier fibré ne sauraient être expliquées par la seule action des

macrofibres d'acier qui ne jouent que sur le processus de fissuration et non sur la résistance en traction. Il semble donc que pour ce type de matériau, l'essai de traction par fendage ne soit pas approprié. La valeur enregistrée n'est plus alors représentative de la résistance en traction du matériau.

La figure 5.2 montre également que la vitesse de développement de la résistance en traction du béton hautes performances est plus importante que celle des 3 autres matériaux. Ceci confirme l'hypothèse d'une cinétique d'hydratation plus grande pour ce matériau établie au regard de l'évolution de la résistance en compression.

La résistance en traction est une propriété mécanique importante pour la durabilité des réparations sous sollicitation de retrait empêché puisque le matériau est soumis à d'importantes contraintes de traction, notamment en surface. Les résultats montrent que le mortier ordinaire et le béton ordinaire ont des résistances en traction similaires et que le béton hautes performances possède une résistance en traction 35% plus élevée. Cette propriété mécanique sera donc un paramètre dont il faudra tenir compte pour différencier le comportement des réparations réalisées avec les différents matériaux, notamment en terme de fissuration.

Tableau 5.2:Résistances en traction par fendage des matériaux de réparation

Matériau	Age du matériau (jours)	Nombre d'éprouvettes	Valeur moyenne (MPa)	Ecart-type (MPa)
MO	7	3	2,5	0,5
	28	3	3,3	0,2
MF	7	3	2,9	0,2
	28	3	4,4	0,1
BO	7	3	2,6	0,3
	28	3	3,1	0,3
BHP	7	3	3,7	0,2
	90	3	5,0	0,2

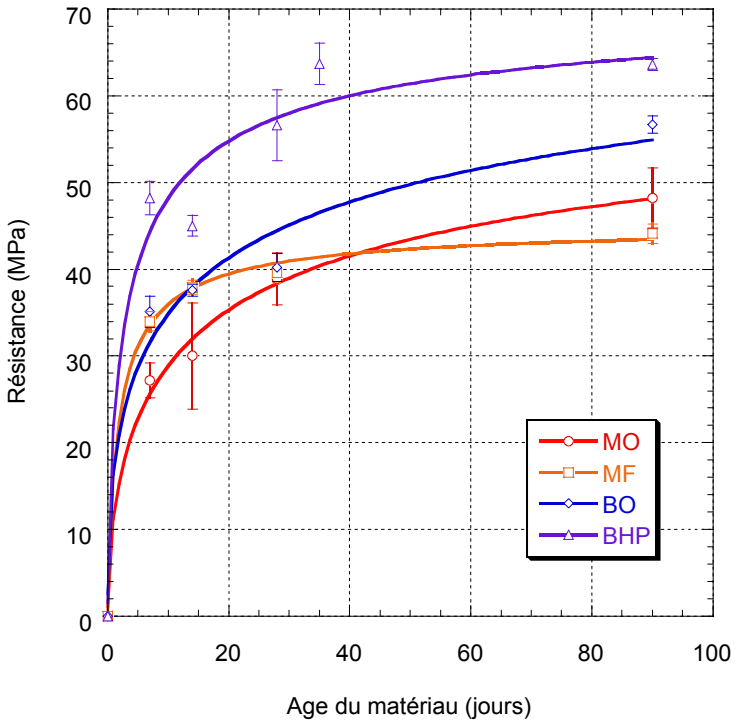


Figure 5.1: Développement de la résistance en compression des matériaux

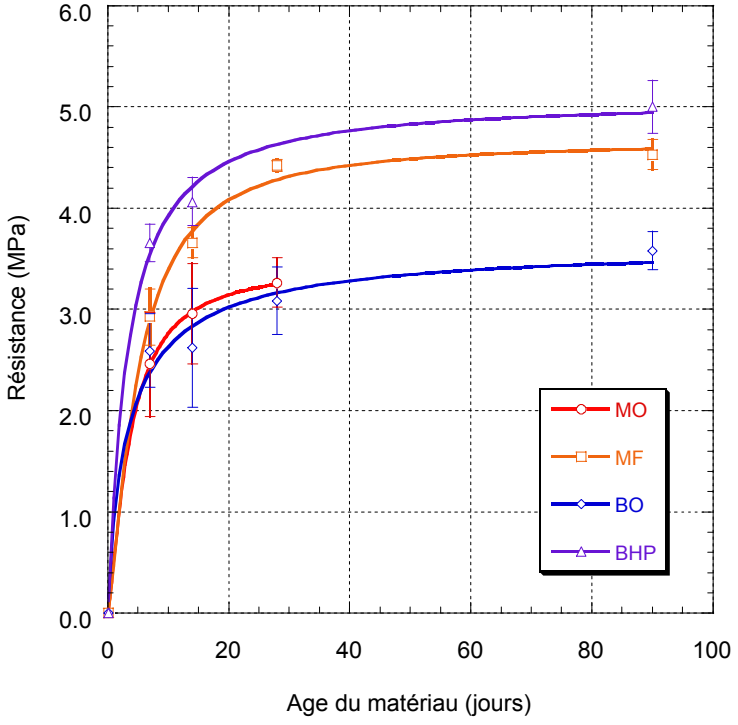


Figure 5.2: Développement de la résistance en traction par fendage des matériaux

5.1.3 Module d'élasticité

Les résultats des essais de module d'élasticité en compression sont donnés dans le tableau 5.3 et sur la Figure 5.3. Les écarts types des différentes mesures sont relativement forts. L'écart-type moyen de l'ensemble des essais est de 2,1 GPa. Cela vient en partie de la nature hétérogène du matériau, mais dans notre cas il est plus probable que cette importante variabilité provienne de la méthode de mesure basée sur la norme ASTM C469. Les résultats sont toutefois jugés satisfaisants pour l'utilisation qui en sera faite.

Les résultats confirment la différenciation qui peut être faite entre les matériaux en terme de résistance en compression et en traction. Les deux mortiers ont un module de Young du même ordre de grandeur et celui-ci évolue de la même façon au cours du temps. Les deux bétons ont développé une rigidité plus élevée que les deux mortiers, en particuliers le béton hautes performances. Dans le cas du béton ordinaire, ce résultat s'explique par la rigidité supplémentaire apportée au matériau par les granulats. Dans le cas du béton hautes performances, le rôle bénéfique des granulats sur le module est couplé à une matrice cimentaire plus rigide car de plus dense.

Les différences de modules de Young mesurés sur les 4 matériaux indiquent par avance les différences de comportement mécanique entre les réparations réalisées avec chaque matériau. Le module de Young du matériau est en effet un paramètre important dans le contexte des réparations minces sous chargement hydrique. Pour un même niveau de déformation de retrait libre, plus le matériau de réparation sera rigide et plus les contraintes de traction seront importantes du fait de la plus grande restriction offerte aux déformations.

Tableau 5.3: Module de Young des matériaux de réparation

Matériau	Age du matériau (jours)	Nombre d'éprouvettes	Valeur moyenne (MPa)	Ecart-type (MPa)
MO	7	3	23,8	2,9
	28	3	30,3	2,2
MF	7	3	24,0	-
	28	3	33,2	0,6
BO	7	3	33,8	3,6
	28	3	35,1	0,9
BHP	7	3	34,7	2,2
	28	3	47,5	2,6

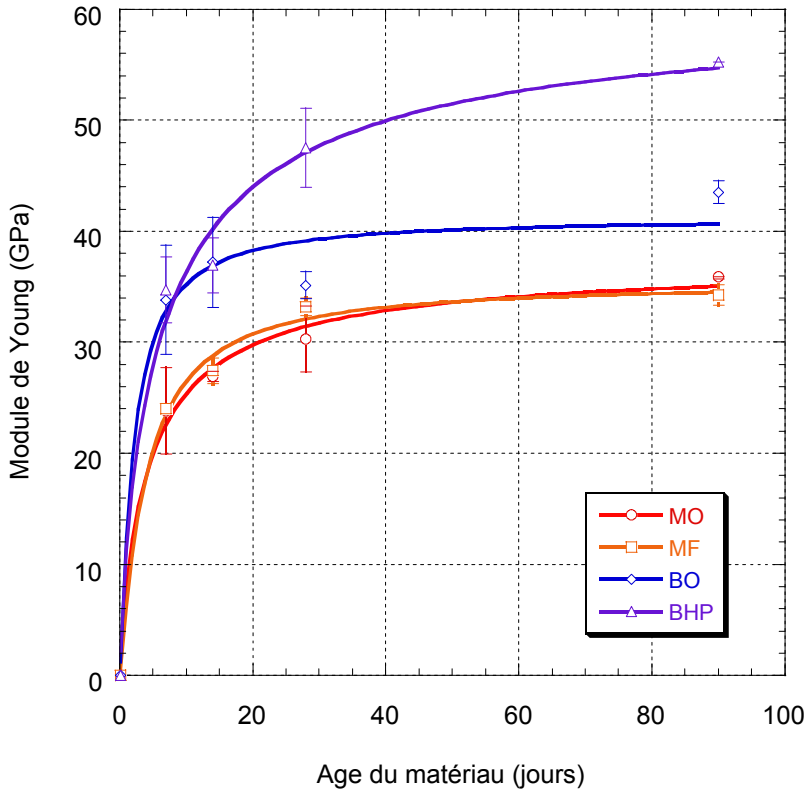


Figure 5.3: Développement du module de Young des matériaux (les moyennes sont affectées d'un intervalle de confiance au niveau de probabilité 95%)

5.1.4 Contrôle de la fissuration par le mortier fibré

Les résultats des essais de flexion 4 points réalisés aux échéances de 7 et 28 jours sur le mortier fibré pour évaluer l'apport des fibres sur le contrôle de la fissuration par le matériau sont présentés sur les figures 5.4 et 5.5. Sur ces figures, chaque courbe représente une éprouvette. Pour les 2 échéances, 3 éprouvettes ont été testées.

De façon générale, les Figures 5.4 et 5.5 montrent que les fibres permettent au matériau de développer un comportement ductile après fissuration de la matrice. Globalement, aucun effet significatif de l'âge au chargement n'a été observé. Aux 2 échéances, un comportement ductile a été obtenu. De plus, pour plusieurs éprouvettes, 2 macrofissures sont apparues dans la zone de moment constant de longueur 100 mm. Ces essais montrent ainsi que l'ajout de 80 kg/m^3 de macrofibres d'acier au mortier permet de développer des structures capables de contrôler la fissuration de façon efficace. Il faut toutefois considérer l'importance de l'épaisseur de l'élément vis à vis de l'orientation des fibres et par conséquent sur leur degré d'efficacité dans le contrôle de la fissuration. Il est important de souligner que la présence des macrofibres d'acier dans le matériau n'a pas pour objectif d'augmenter la résistance en traction mais bien de favoriser un comportement ductile permettant un contrôle de la fissuration dans les réparations minces.

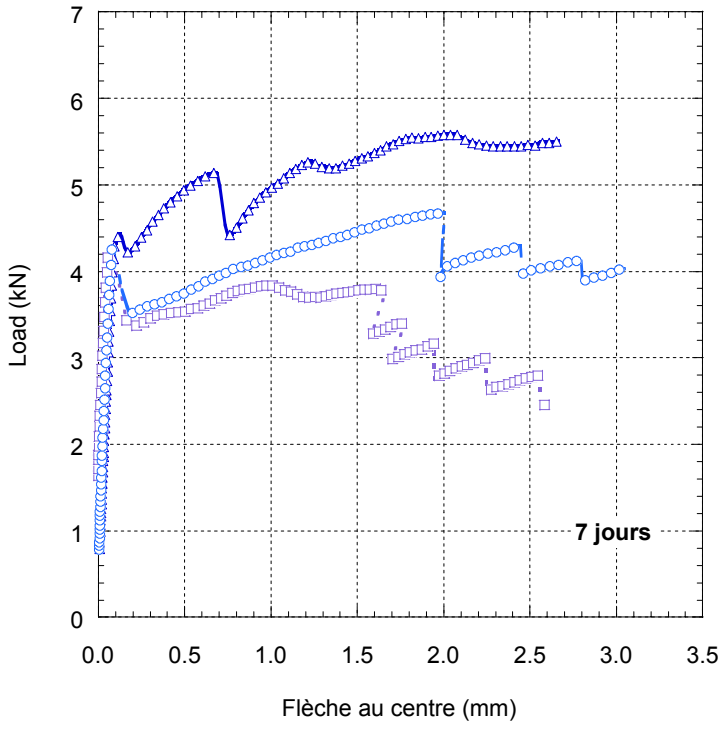


Figure 5.4: Résultats de l'essai de flexion 4 points après 7 jours de cure humide

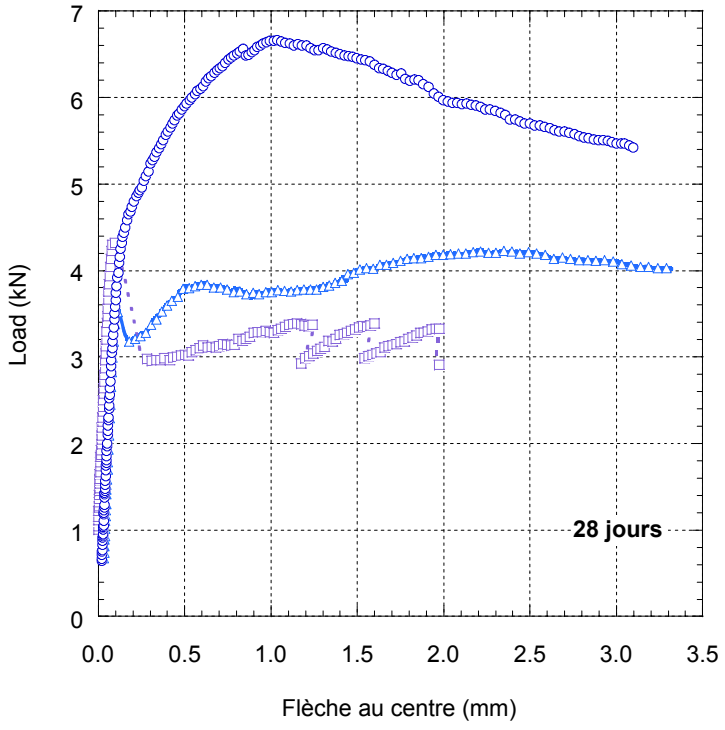


Figure 5.5: Résultats de l'essai de flexion 4 points après 28 jours de cure humide

5.2 PROPRIETES HYGROMETRIQUES

Dans le cadre de l'étude de la fissuration due au retrait empêché des réparations minces en béton, les propriétés hygrométriques des matériaux sont particulièrement importantes. Ces propriétés ou phénomènes sont en effet à l'origine du chargement auquel est soumis le matériau.

5.2.1 Retrait endogène

Les déformations de retrait endogène des matériaux de réparation sont présentées sur la figure 5.6. Chaque point sur ces courbes représente la moyenne des mesures réalisées sur 2 éprouvettes identiques. L'échelle de l'axe des abscisses débute à 0, mais les mesures ont en fait commencé 24 heures après la confection des matériaux.

Les résultats montrent que les 4 matériaux ont des comportements différents en retrait endogène, aussi bien en amplitude qu'en cinétique des déformations mesurées. Les deux mortiers sont les matériaux qui ont développé les déformations de retrait endogène les plus importantes. Ce résultat est tout à fait cohérent avec la formulation choisie pour ces deux matériaux. En effet, les deux mortiers contiennent une quantité de ciment et globalement un volume de pâte nettement plus importants que les deux bétons. Le béton ordinaire est le matériau qui a développé les déformations de retrait endogène les moins importantes. Il s'agit aussi du matériau qui possède la quantité de ciment la moins importante et le volume de pâte le plus faible. Il faut finalement remarquer que la vitesse de développement des déformations de retrait endogène du béton hautes performances est plus importante que celle des 3 autres matériaux. Dans le cas de ce matériau, une part importante des déformations endogènes est vraisemblablement survenue au cours des premières 24 heures, période non prise en compte dans les mesures. Il est ainsi délicat de comparer de façon stricte l'amplitude des déformations mesurées sur le béton hautes performances à celles mesurées sur les 3 autres matériaux.

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

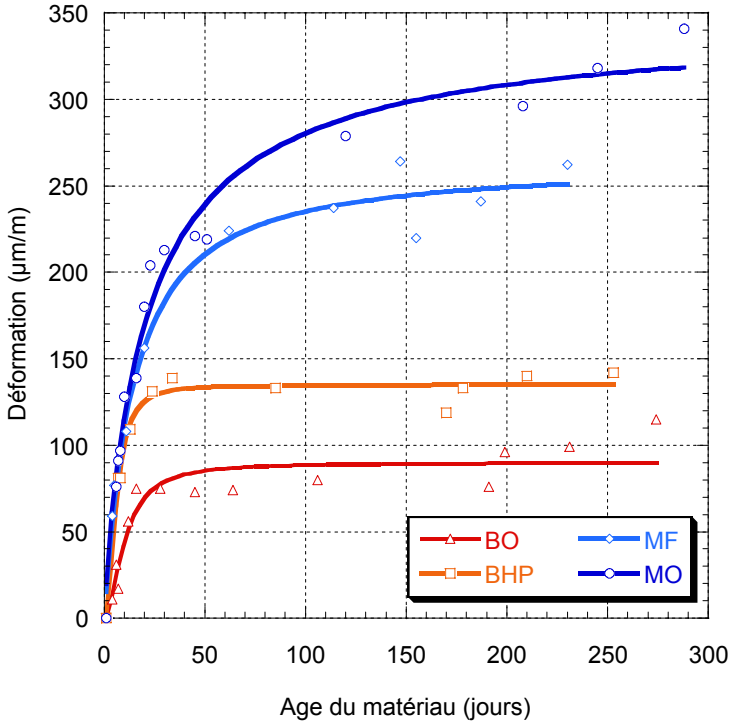


Figure 5.6: Résultats des essais de retrait endogène des matériaux de réparation (début des mesures après 24 heures, éprouvettes scellées, T=23°C)

5.2.2 Retrait avec séchage et perte de masse due au séchage

Les déformations de retrait avec séchage des matériaux de réparation sont présentées sur la figure 5.7. Chaque point sur ces courbes représente à nouveau la moyenne des mesures réalisées sur 2 éprouvettes identiques. Les mesures ont débutées après une cure humide de 3 jours identique à celle appliquée aux réparations. Parallèlement au suivi des déformations de retrait, la masse des éprouvettes a été suivie. Les résultats sont présentés à la figure 5.8.

Le comportement hydrique des 4 matériaux est très différent aussi bien en terme de retrait que de perte de masse. Les deux mortiers, qui affichent des comportements similaires, ont développé des déformations nettement plus grandes que celles mesurées sur les deux bétons. Ce sont aussi les matériaux dont les pertes de masse sont plus importantes. Ce comportement s'explique par le volume de pâte beaucoup plus élevé des deux mortiers par rapport aux deux bétons. Les deux bétons ont développé des déformations de retrait avec séchage de 30% à 50% plus petites que les mortiers. Il faut remarquer, comme prévu, que le retrait avec séchage du béton hautes performances est le plus faible des quatre matériaux. Dans le cas du béton hautes performances, malgré un volume de pâte plus important que celui du béton ordinaire, le faible rapport eau/ciment et la présence de fumée de silice ont permis de raffiner la porosité capillaire et ainsi de rendre le matériau moins sensible au séchage et donc de diminuer son retrait. Il est également intéressant de comparer le comportement hydrique du béton ordinaire et du mortier ordinaire. Le mortier ordinaire correspond en fait au mortier du béton ordinaire avec un rapport de 60 % entre les volumes de pâte. En comparant les pertes de masse et les déformations de retrait des 2 matériaux, on s'aperçoit qu'elles évoluent avec un rapport du même ordre que celui des volumes de pâte. L'effet de « dilution» du volume de pâte sur les propriétés de transport des matériaux cimentaires de même rapport eau/ciment est donc confirmé par ces résultats. Cette propriété sera utilisée ultérieurement dans la modélisation du séchage des réparations au Chapitre 10.

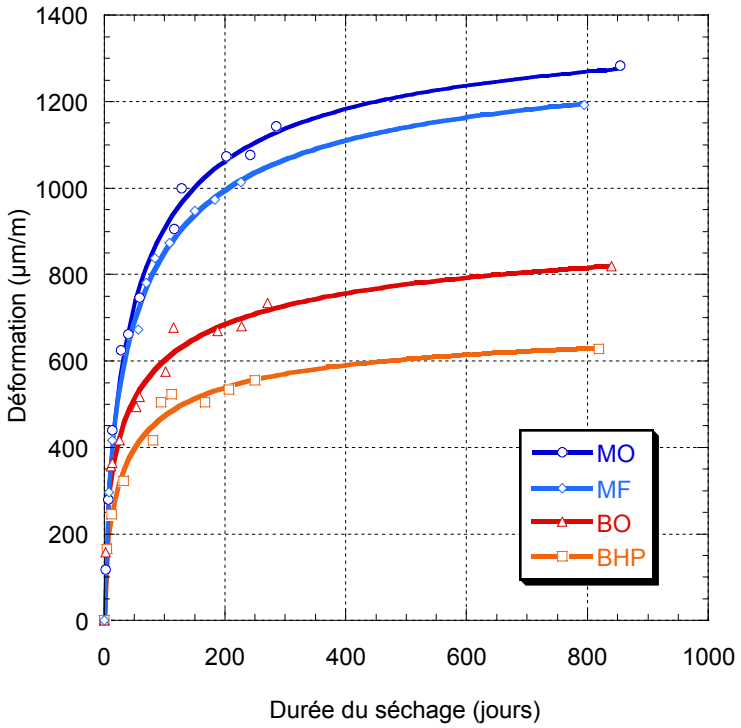


Figure 5.7: Résultats des essais de retrait avec séchage des matériaux de réparation (H.R.=50%, T=23°C)

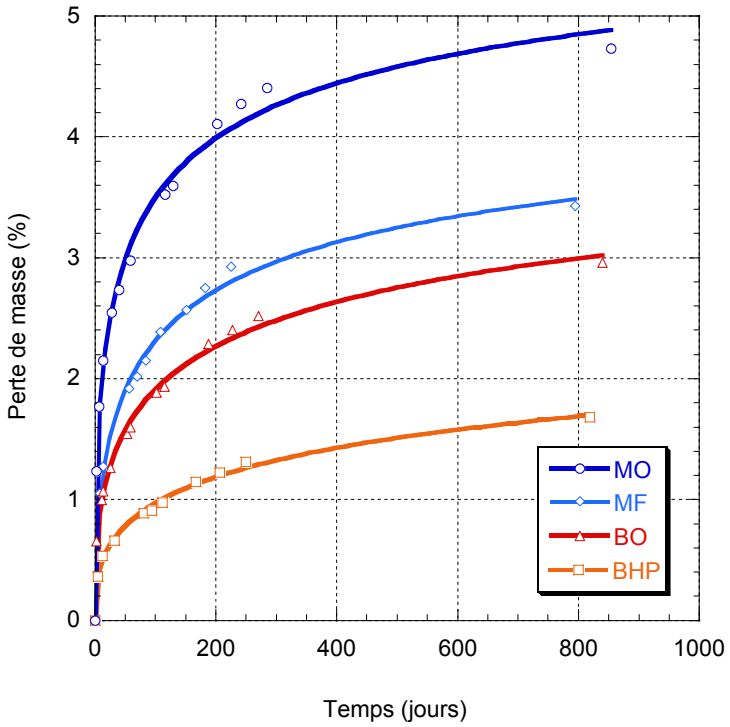


Figure 5.8: Résultats des essais de perte de masse au séchage des matériaux de réparation (H.R.=50%, T=23°C)

5.3 CAPACITE D'ADAPTATION PAR FLUAGE DES MATERIAUX DE REPARATION

Cette partie du chapitre 5 présente les résultats des essais de fluage en traction réalisés sur les différents matériaux de réparation. Associé à un essai de retrait libre réalisé en parallèle, l'essai de fluage permet d'évaluer la capacité d'adaptation des matériaux en situation de retrait empêché (Bissonnette, 1996). Il sera alors intéressant de comparer les résultats de ces essais au comportement in situ des réparations exprimé notamment en terme de fissuration.

Tel que mentionné au chapitre 4, paragraphe 4.3.2, ces essais ont été menés suivant différents niveaux de contrainte par rapport à la contrainte de rupture en traction, en condition endogène ou avec échange hydrique avec le milieu ambiant (50% HR, 23°C). Le tableau 5.4 résume l'ensemble des conditions testées lors des essais de fluage en traction.

Tableau 5.4: Niveaux de contrainte et conditions d'échange testés

Matériau	Niveau de contrainte (σ/f_t)	Conditions d'échange hydrique testées	
		50 % HR, 23°C	Endogènes
BO	50%	oui	non
	38%	oui	oui
	25%	oui	non
BHP	50%	oui	non
MO	32%	oui	non
MF	25%	oui	non

La capacité d'adaptation des matériaux est exprimée sous la forme du coefficient fluage spécifique/retrait, noté par la suite $k_{F/R.}$ En effet, la mise en relation de la déformation de fluage spécifique avec celle de retrait, mesurée au même instant dans les mêmes conditions hygrothermiques, permet d'analyser le comportement du matériau dans le contexte des conditions de déformations empêchées auxquelles sont soumises les réparations. En effet, dans le cas spécifique du retrait empêché, l'augmentation de la capacité de fluage d'un matériau n'a

d'intérêt que si le bilan fluage/retrait augmente aussi. Ce coefficient d'adaptation reflète donc, pour un matériau, sa capacité à relaxer les contraintes générées par le retrait empêché. Ce coefficient représente ainsi un indice intéressant de la capacité relative d'adaptation du matériau aux déformations de retrait empêché.

Dans cette analyse, les résultats sont directement présentés en terme de déformation de fluage spécifique en fonction du retrait avec ou sans échange hydrique. Le calcul de la déformation de fluage spécifique (déformation de fluage rapportée à la contrainte de traction unitaire) permet de comparer les résultats entre eux, même si le niveau de contrainte n'est pas toujours le même. En effet, pour des niveaux de contrainte inférieurs à 60% de la résistance en traction, la déformation de fluage est proportionnelle à la contrainte appliquée. Les résultats des essais de fluage et de retrait sont présentés de façon complète en annexe (cf. annexe 1 : résultats des essais de fluage en traction).

Les figures 5.9 à 5.13 présentent les relations fluage-retrait des différents matériaux de réparation. Cette relation est linéaire pour le béton ordinaire et le béton hautes performances et non linéaire pour le mortier ordinaire et le mortier fibré. Globalement, cela confirme la relation approximativement linéaire entre les déformations de fluage spécifique et les déformations de retrait des béton en conditions de séchage et en conditions endogènes. Le cas des 2 mortiers est un peu plus complexe, puisque la relation entre les deux grandeurs est plutôt bilinéaire. Cependant, les données recueillies dans le cadre de cette étude ne sont pas suffisantes pour apporter une explication.

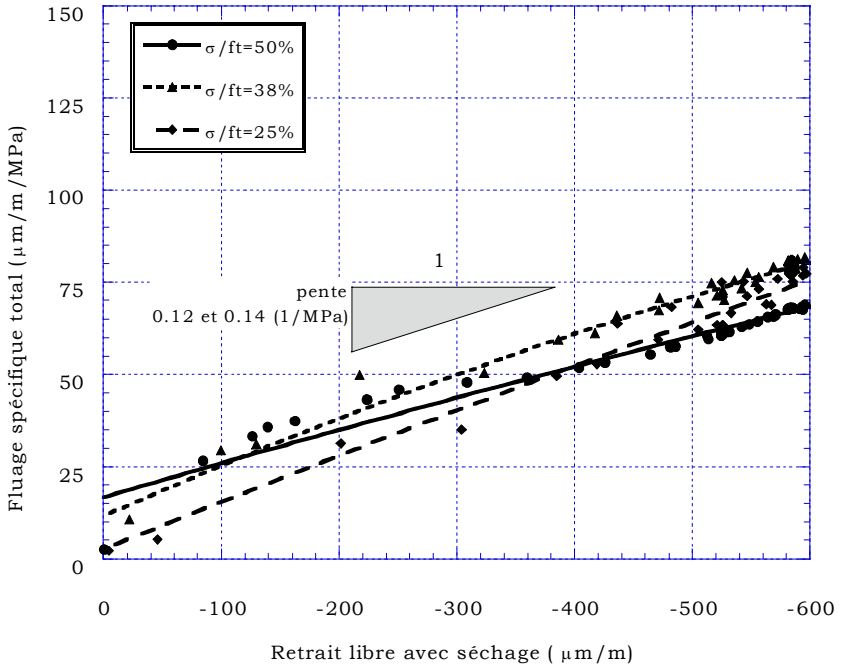


Figure 5.9: Relation Fluage/Retrait pour le Béton Ordinaire en condition d'échange hydrique (H.R.=50%, T=23°C)

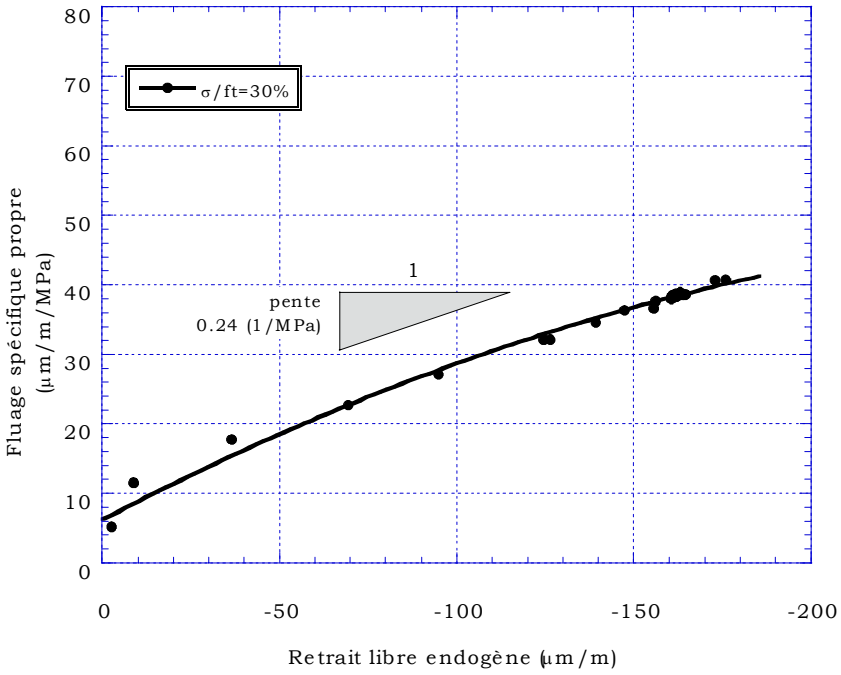


Figure 5.10: Relation Fluage/Retrait pour le Béton Ordinaire en condition endogène (T=23°C)

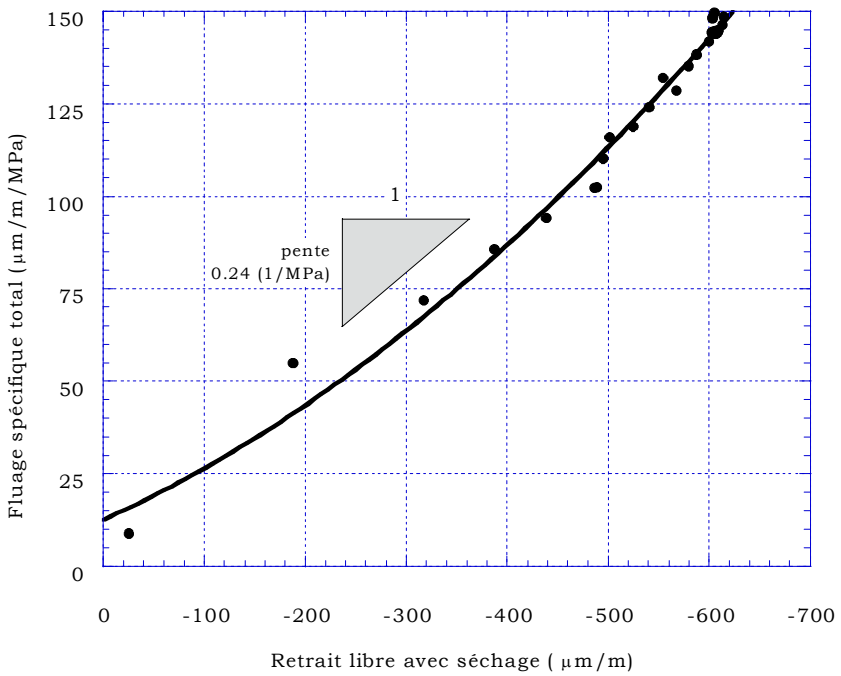


Figure 5.11: Relation Fluage/Retrait pour le Béton Hautes Performances en condition d'échange hydrique (H.R.=50%, T=23°C)

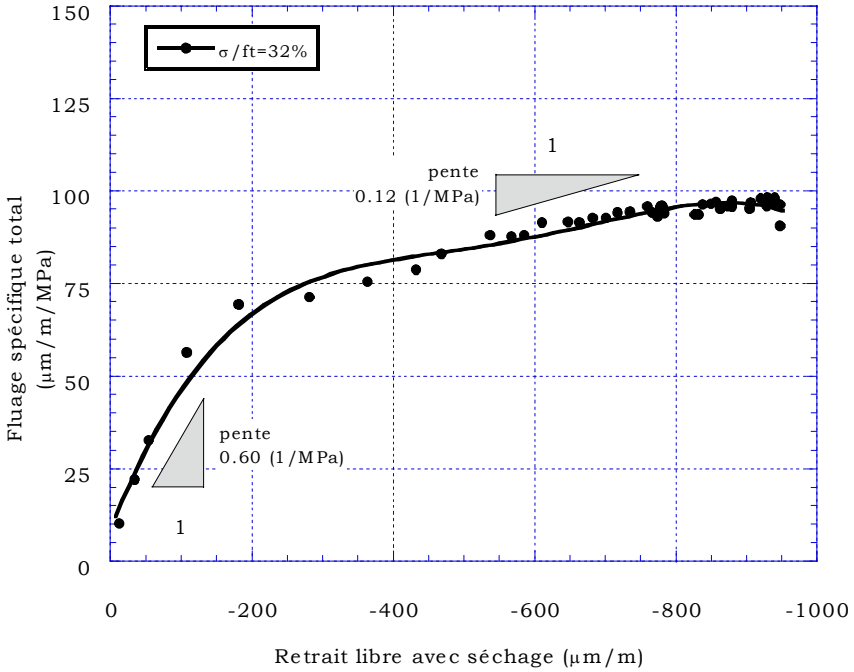


Figure 5.12: Relation Fluage/Retrait pour le Mortier Ordinaire en condition d'échange hydrique (H.R.=50%, T=23°C)

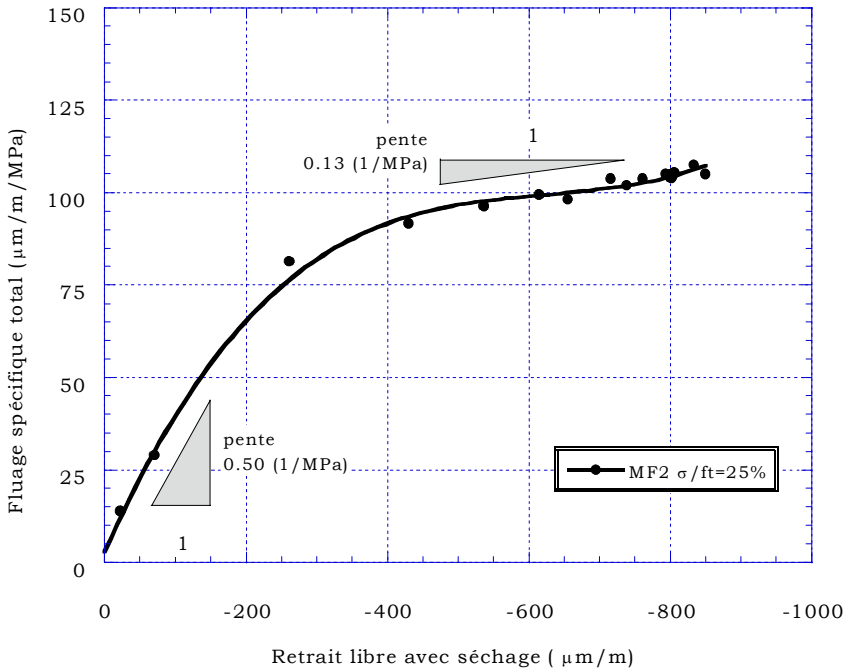


Figure 5.13: Relation Fluage/Retrait pour le Mortier Fibré en condition d'échange hydrique (H.R.=50%, T=23°C)

Comme le montre la Figure 5.9, la relation fluage/retrait est indépendante du niveau de contrainte puisque la pente obtenue pour les 3 niveaux testés, à savoir 25%, 38% et 50% de la résistance en traction, est quasi constante. Ce résultat est toutefois à confirmer pour des niveaux de contrainte plus élevés puisque dans de telles conditions de chargement, la proportionnalité entre la déformation de fluage et la contrainte appliquée n'est plus assurée. Ainsi, pour des niveaux de contrainte variant entre 0% et 50% de la résistance en traction, la capacité d'adaptation par fluage du matériau de réparation est sensiblement la même.

Le tableau 5.5 présente les valeurs des coefficients d'adaptation $k_{F/R}$ calculés à partir des courbes de fluage spécifique en fonction du retrait. Ces valeurs sont les pentes moyennes des courbes sur les 56 premiers jours d'essai. Lorsque la relation entre les deux grandeurs est linéaire, un seul coefficient est déterminé. En revanche, lorsque la relation est non linéaire et de forme globale bilinéaire, deux coefficients sont calculés, chacun correspondant à la pente des deux demi-droites.

Tableau 5.5: Coefficient d'adaptation $k_{F/R}$ des matériaux de réparation

Matériau	Conditions	Type de relation	Coefficient fluage/retrait $k_{F/R}$ [MPa^{-1}]	
BO	avec séchage	linéaire	0,13	
BO	endogène	linéaire	0,24	
BO	séchage seul	linéaire	0,07	
BHP	avec séchage	linéaire	0,24	
MO	avec séchage	bi-linéaire	0,60	0,12
MF	avec séchage	bi-linéaire	0,50	0,13

Les résultats montrent tout d'abord que le coefficient d'adaptation par fluage dépend des conditions d'échange hydrique auxquelles est soumis le matériau. En effet, dans le cas du béton ordinaire le coefficient d'adaptation vaut 0,24 MPa^{-1} en condition endogène et 0,13 MPa^{-1} en condition de séchage. La capacité d'adaptation par fluage semble donc, pour un même matériau, plus importante en condition endogène qu'en condition d'échange hydrique à 50% H.R.

Ensuite, les résultats montrent que le coefficient d'adaptation varie fortement en fonction de la nature du matériau. Le coefficient d'adaptation du BHP est en effet quasiment 2 fois plus élevé que celui du BO, en condition d'échange hydrique. Cela montre que des paramètres de formulation tels que la nature du ciment, la présence ou non de fumée de silice et le rapport E/C ont un effet significatif sur le comportement viscoélastique du matériau et sur sa capacité d'adaptation par fluage. De plus contrairement à ce que l'on aurait pu croire, comme le montre ce résultat, le BHP pourrait se révéler un matériau mieux adapté que le BO sur le plan de la compatibilité des déformations.

Concernant l'influence du volume de pâte, il est intéressant de comparer le comportement du mortier ordinaire MO à celui du béton ordinaire BO (puisque MO est le mortier issu de BO). On constate que la capacité d'adaptation par fluage du mortier est globalement plus importante que celle du béton ordinaire malgré des déformations de retrait plus importantes. En effet, le mortier ordinaire possède un coefficient d'adaptation à faible niveau de retrait 4 fois plus important

que celui du béton ordinaire. Pour des niveaux de retrait plus important, les coefficients d'adaptation par fluage deviennent similaires.

Il est aussi intéressant de remarquer que les deux mortiers MO et MF ont développé une relation fluage-retrait d'allure bi-linéaire. Pour de faibles niveaux de retrait, le coefficient d'adaptation par fluage des 2 mortiers est très élevé avec une valeur de l'ordre de 0,50. Pour des niveaux de retrait plus importants, la valeur du coefficient d'adaptation des mortiers rejoint celle obtenue avec le béton ordinaire.

5.4 CONLUSIONS

Dans le cadre de ce projet sur la fissuration due au retrait empêché des réparations minces en béton, l'un des objectifs était de tester des matériaux dont le comportement volumétrique lors du séchage est différent. Comme le montrent les résultats de ce chapitre de caractérisation des propriétés des matériaux, cet objectif a été atteint. Étant donné l'importante disparité des déformations de retrait développées au séchage par les 4 matériaux, nous pouvons anticiper que le comportement des réparations réalisées en conditions in situ devrait être très différent, notamment en ce qui concerne la fissuration. Dans le cas du mortier fibré, il est par ailleurs anticipé que la présence des fibres ait un effet positif sur la fissuration, laquelle est susceptible de se produire dans un matériau développant autant de retrait.

CHAPITRE 6

COMPORTEMENT HYGROMÉTRIQUE DES RÉPARATIONS

Afin de mieux comprendre le comportement mécanique et la fissuration des réparations in situ, le suivi de leur comportement hygrométrique a été réalisé. Pour cela, les conditions de température et d'humidité ont été mesurées sur le site d'exposition des réparations. En parallèle, des essais de perte de masse selon la méthode des "tranches" ont été réalisés sur les différents matériaux de réparation. Les résultats ont permis d'évaluer les profils de teneur en eau dans les réparations, permettant ainsi d'estimer en conditions climatiques réelles leur degré de séchage. Enfin, les déformations induites par les cycles de mouillage-séchage ont été mesurées sur les matériaux de réparation en conditions de déformations libres et en conditions de déformations empêchées. Les différentes techniques d'essais et de mesures sont présentées en détail dans le chapitre 4.

6.1 CONDITIONS CLIMATIQUES EXTERIEURES

Les conditions climatiques en température et en humidité ont été mesurées directement sur le site d'exposition des éléments réparés à l'aide de capteurs placés à l'abri du soleil et protégés du vent. Deux générations de capteur ont été utilisées. La première ne permettait pas l'exposition à des températures en dessous de zéro. Cela explique pourquoi pour l'année 1998 nous ne disposons que des valeurs correspondant aux mois d'été. En revanche, la seconde génération de capteur permettait la mesure des températures en-dessous de zéro. C'est pourquoi pour l'année 1999 et 2000 nous disposons des mesures correspondant aux mois d'hiver également.

6.1.1 Température

Des exemples de relevés de température enregistrée sur le site d'entreposage des réparations au cours de l'été et de l'hiver sont présentés sur les figures 6.1 et 6.2. L'ensemble des relevés de température pour les 3 ans de suivi est donné en annexe (Annexe 1). Sur chacun des graphiques, l'ensemble des températures mesurées est affiché ainsi que la courbe de tendance moyenne. Globalement, les températures sont très variables et fluctuent rapidement d'une journée à une autre et également au cours d'une même journée. Les cycles journaliers de température ont une amplitude moyenne de l'ordre de 15°C quelle que soit la saison. Une observation à l'échelle d'une année montre que la courbe de tendance moyenne suit une évolution de forme sinusoïdale.

6.1.2 Humidité relative

Des exemples de relevés d'humidité relative enregistrée sur le site d'entreposage des réparations au cours de l'été et de l'hiver sont donnés sur les figures 6.3 et 6.4. L'ensemble des relevés d'humidité relative pour les 3 ans de suivi est donné en annexe (Annexe 1). Comme pour les relevés de température, sur chacun des graphiques, l'ensemble des valeurs d'humidité relative mesurées est affiché ainsi que la courbe de tendance moyenne. En complément, le tableau 6.1 résume les valeurs d'humidité relative moyenne par saison accompagnées des écarts types et des valeurs minimales et maximales.

Tableau 6.1: Synthèse des mesures d'humidité relative par saison mesurées sur le site d'entreposage des réparations

	E-98	E-99	A-00	H-99/00	E-00	A-00
H.R. moyen	77,0	70,1	76,8	80,6	63,8	86,3
Écart type	23,0	16,8	14,9	17,9	23,9	16,1
Min.	18,6	25,3	32,4	17,5	17,5	45,0
Max.	100	99,0	100	100	100	100

Comme le montrent les figures 6.3 et 6.4, l'humidité relative sur le site d'entreposage des réparations fluctue rapidement à l'échelle de la journée et sur

une amplitude importante. Le tableau 6.1 montre que l'humidité relative la plus faible est de l'ordre de 15-25% en été et en hiver, et de l'ordre 30-50 % en automne. Quelle que soit la saison, des valeurs d'humidité relative de 100 %, correspondant aux journées de pluie, sont mesurées. Les valeurs d'écart type données dans le tableau 6.1 indiquent qu'en l'espace de 2 heures (intervalle de temps entre 2 mesures), des variations d'humidité relative de l'ordre de 15-25 % sont enregistrées. Globalement, l'humidité relative moyenne annuelle sur le site d'entreposage des réparations est de l'ordre de 75 %, même si des valeurs moyennes saisonnières plus basses en été et plus élevées en automne sont obtenues comme l'indique le tableau 6.1.

Dans la mesure où des cycles rapides d'humidité peuvent avoir une forte incidence sur le comportement mécanique et la fissuration des réparations, il est intéressant d'observer les variations d'humidité relative à l'échelle d'une journée. Des exemples de cycles journaliers types pour les saisons d'été et d'hiver sont donnés sur les figures 6.5 et 6.6.

Ces deux graphiques montrent que des cycles journaliers d'humidité relative de forte amplitude sont surtout enregistrés au cours de l'été. La variation d'humidité peut atteindre 40 % en l'espace de 4 à 8 heures.

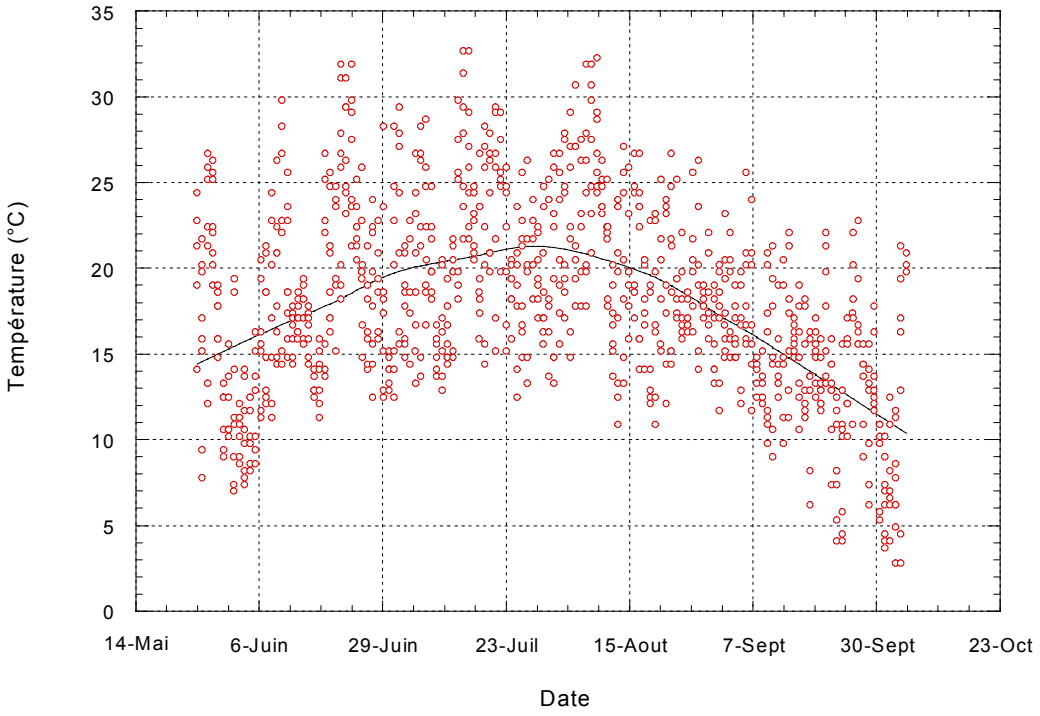


Figure 6.1: Températures enregistrées sur le site d'entreposage des réparations au cours de l'été 1998

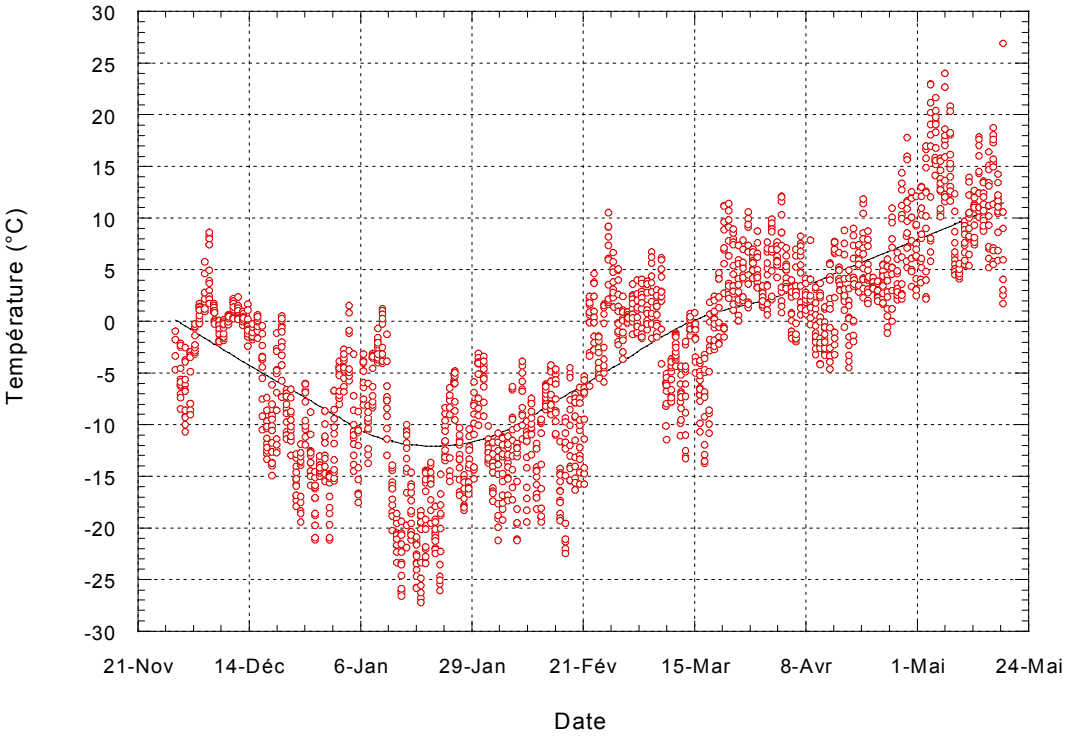


Figure 6.2: Températures enregistrées sur le site d'entreposage des réparations au cours de l'hiver 1999-2000 et du printemps 2000

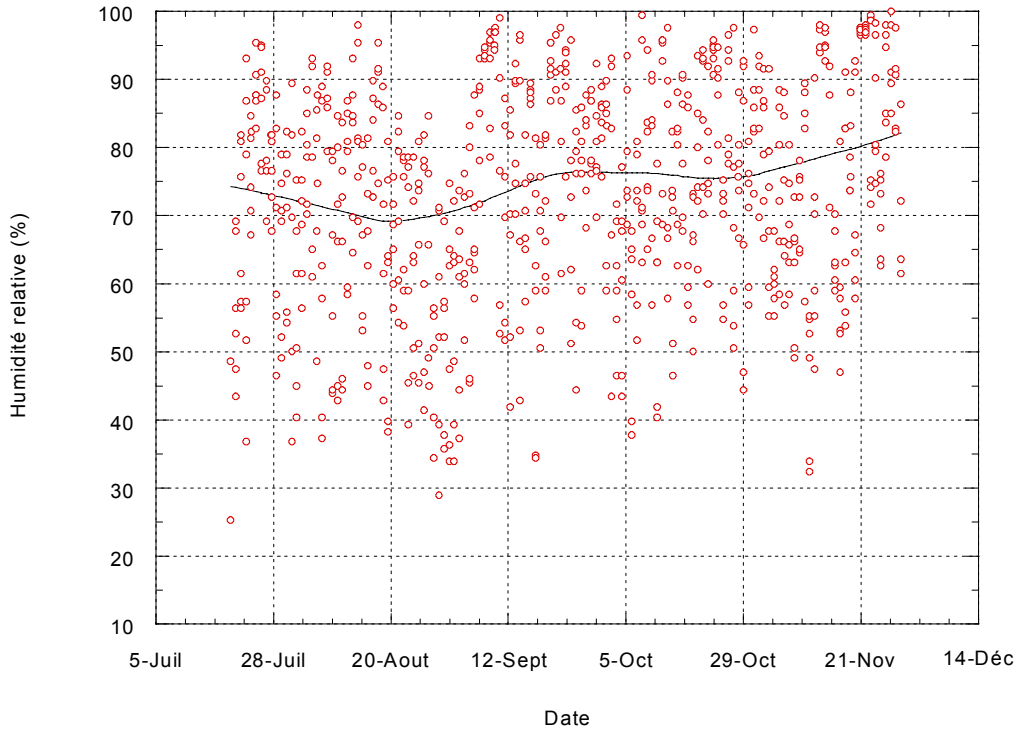


Figure 6.3: Humidité relative enregistrée sur le site d'entreposage des réparations au cours de l'été 1999

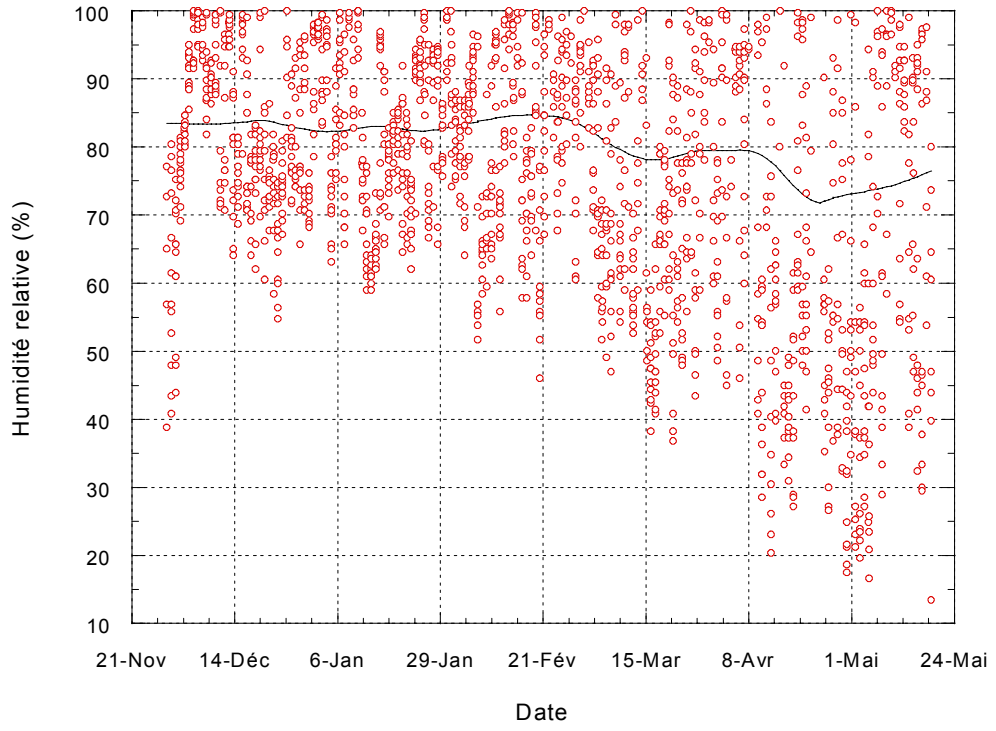


Figure 6.4: Humidité relative enregistrée sur le site d'entreposage des réparations au cours de l'hiver 1999-2000 et du printemps 2000

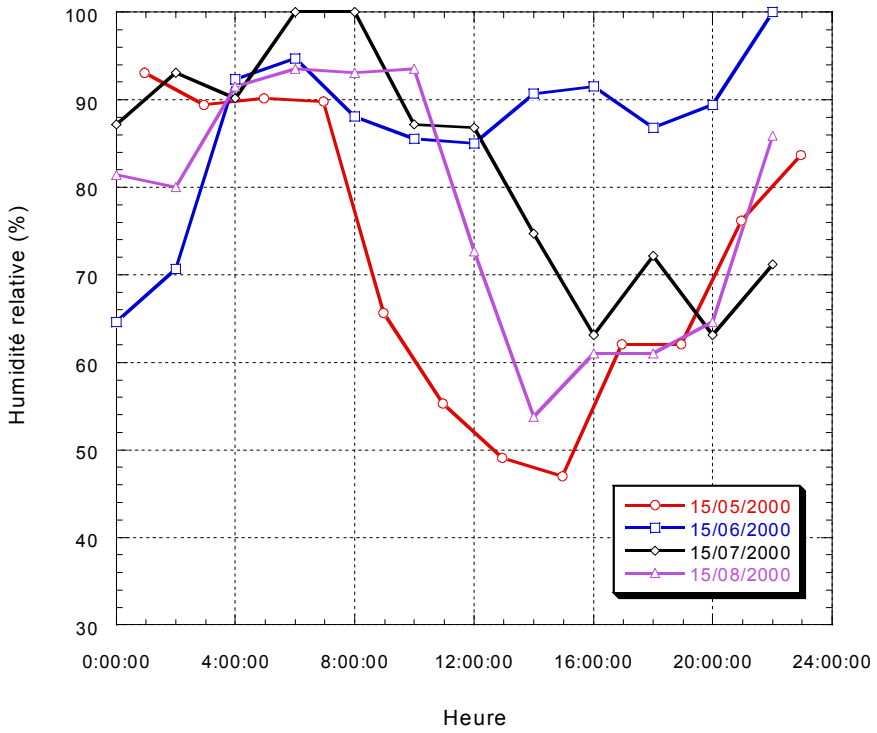


Figure 6.5: Exemples de cycles journaliers d'humidité relative mesurée au cours de l'été 2000 sur le site d'entreposage des réparations

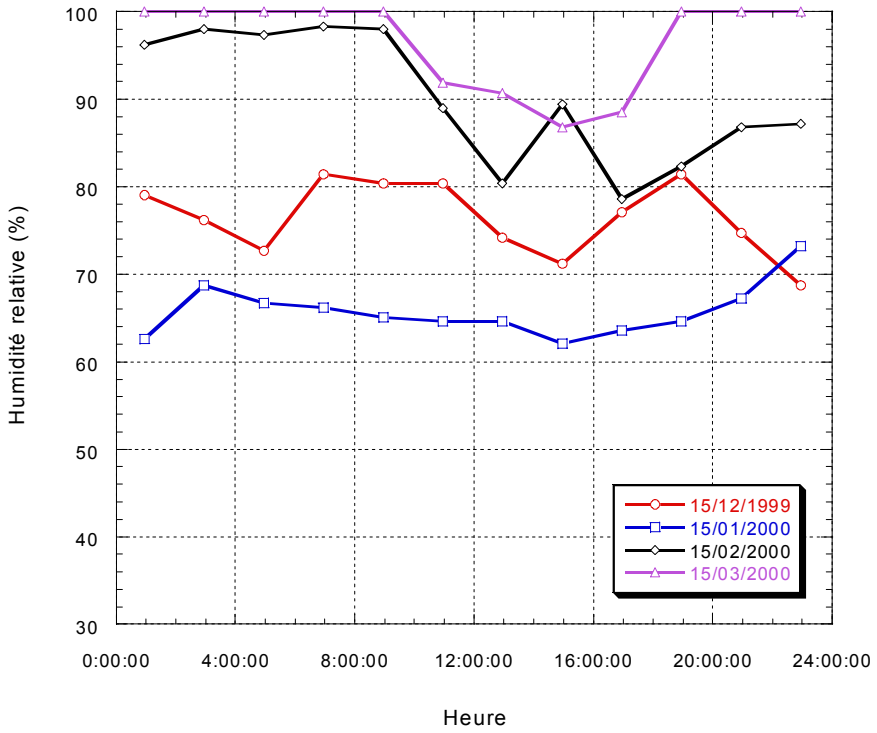


Figure 6.6: Exemples de cycles journaliers d'humidité relative mesurée au cours de l'hiver 1999-200 sur le site d'entreposage des réparations

6.2 SECHAGE DES MATERIAUX DE REPARATION

Après avoir étudié les conditions climatiques en température et en humidité relative auxquelles sont soumises les réparations, ce paragraphe présente les conséquences de celles-ci sur la teneur en eau des matériaux de réparation.

6.2.1 Profil de teneur en eau des matériaux de réparation

Comme cela est expliqué au Chapitre 4, la méthode des tranches a permis d'obtenir par calcul la teneur en eau des matériaux de réparation à différentes profondeurs et pour différents temps. Cela a ensuite permis la détermination des profils de teneur en eau dans les réparations sous l'effet des conditions climatiques extérieures.

Les profils de teneur en eau des différents matériaux de réparation sont donnés sur les figures 6.7 à 6.9 (le comportement hygrométrique du mortier fibré n'a pas été étudié dans la mesure où sa matrice est similaire à celle du mortier ordinaire). Globalement, ces profils montrent que les conditions hygrométriques extérieures auxquelles sont soumises les réparations ne conduisent pas à un séchage important du matériau et qu'après 2 ans, l'équilibre avec le milieu ambiant est loin d'être atteint.

Les conditions d'exposition induisent seulement un séchage superficiel qui dépend non seulement des cycles de mouillage-séchage mais également de la nature du matériau de réparation, c'est à dire de la microstructure et de la quantité d'eau accessible au séchage. En surface, le mortier ordinaire et le béton ordinaire perdent jusqu'à 50 kg/m3 d'eau alors que le béton hautes performances ne perd que 20 kg/m3 d'eau. Cela reflète bien la sensibilité de chacun des matériaux au mouvement d'eau sous l'action du séchage. Le mortier ordinaire et le béton ordinaire sont deux matériaux identiques en ce qui concerne la nature de leur matrice cimentaire. Leur comportement hydrique est donc tout a fait semblable. En revanche, leur volume de pâte étant très différent, les déformations de retrait de ces deux matériaux seront très différentes. Le faible rapport e/c du

béton hautes performances ainsi que la présence de fumée de silice expliquent son comportement hygrométrique particulier.

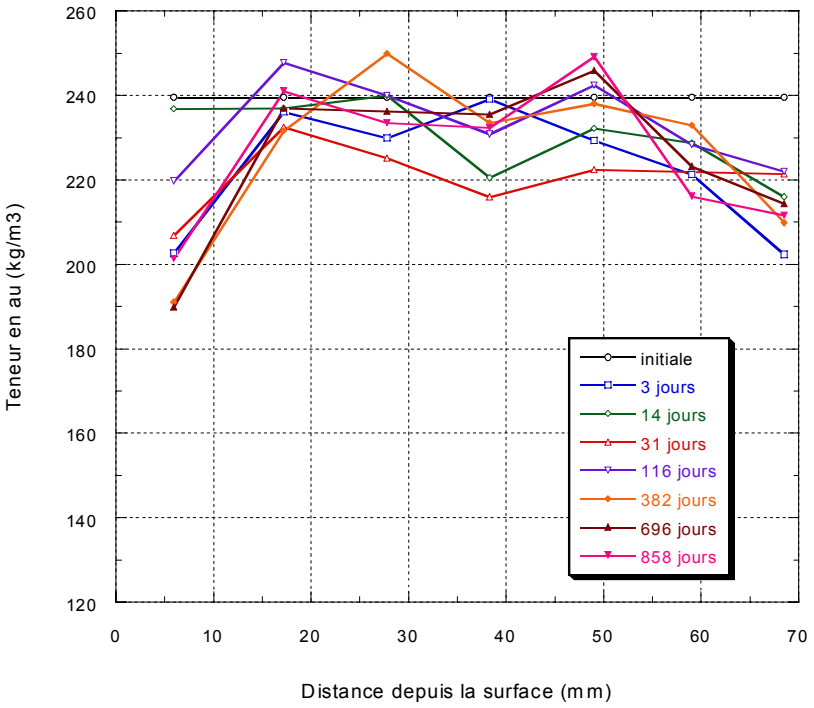


Figure 6.7: Profil de teneur en eau du mortier ordinaire

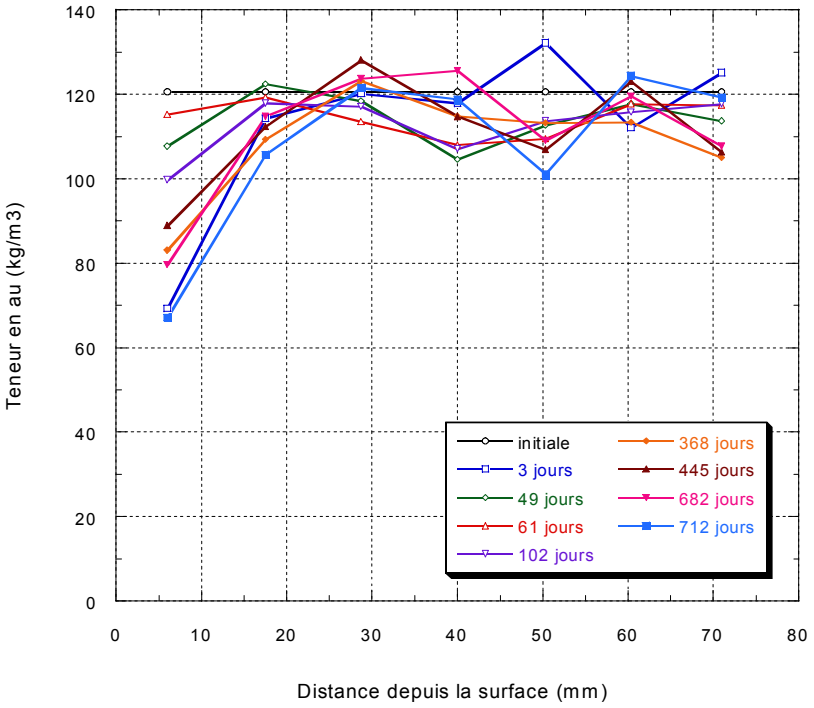


Figure 6.8: Profil de teneur en eau du béton ordinaire

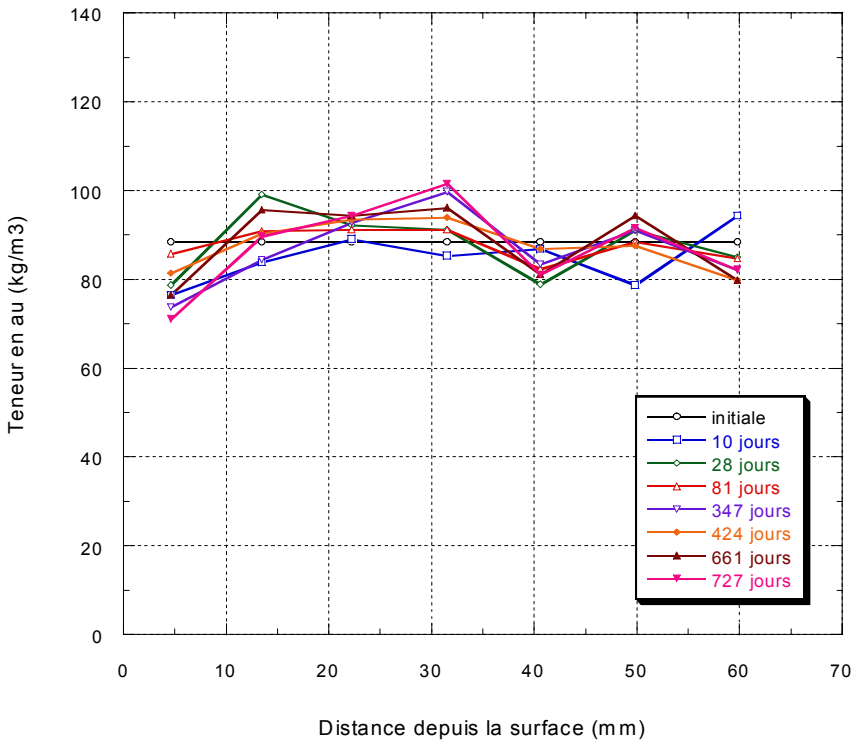


Figure 6.9: Profil de teneur en eau du béton hautes performances

6.2.2 Existence d'une épaisseur seuil de séchage pour les réparations

Les profils de teneur en eau des différents matériaux de réparations présentés sur les figures 6.7 à 6.9 montrent que, selon la nature du matériau, en dépit de la durée d'exposition au séchage, seulement une partie de l'épaisseur des réparations est atteinte par le séchage pour la durée de suivi considérée. Ce résultat semble indiquer l'existence d'une épaisseur seuil de séchage en conditions hygrométriques réelles sous l'action des cycles de mouillage-séchage.

Afin d'étudier de façon plus spécifique l'existence d'une épaisseur seuil, il est intéressant de suivre l'évolution des teneurs en eau des matériaux de réparation en fonction du temps à différentes profondeurs. Les résultats sont donnés sur les figures 6.10 à 6.12 et sont exprimés sous la forme d'une évolution de teneur en eau dans les différentes tranches de mesure. Les variations enregistrées et la précision du calcul de la teneur en eau ne permettent pas de quantifier de façon exacte la valeur de cette épaisseur seuil de séchage mais permettent d'en établir une première estimation.

Pour les 3 matériaux, les graphiques 6.10 à 6.12 montrent clairement que la majeure partie des variations de teneur en eau sont enregistrées dans la "tranche" correspondant aux premiers 10 mm de l'épaisseur des réparations. En effet, seul le comportement hygrométrique de la tranche 0-10 mm se distingue nettement de celui des autres tranches. Dans le cas du mortier ordinaire et du béton ordinaire, au-delà de la tranche 10-20 mm, les variations de teneur en eau calculées oscillent autour de la valeur de teneur en eau initiale. Pour ces 2 matériaux, ce résultat signifie qu'au-delà des premiers 20 mm, la réparation n'est quasiment pas affectée par le séchage et que l'épaisseur seuil de séchage se situe entre 10 mm et 20 mm de profondeur. Dans le cas du béton hautes performances le comportement hygrométrique enregistré est différent. Seul la tranche 0-10 mm est sujette au séchage. En effet, pour toutes les autres tranches, les variations de teneur en eau sont faibles et oscillent autour de la valeur de teneur en eau initiale. Ainsi, dans le cas particulier du béton hautes performances, l'épaisseur seuil de séchage se situerait à l'intérieur de la zone correspondant aux premiers 10 mm de matériau.

Ces résultats tendent à confirmer l'existence d'une épaisseur seuil dans le comportement hygrométrique des réparations soumises au séchage en conditions climatiques réelles, c'est à dire avec en présence de cycles de mouillage-séchage. Ainsi, pour des épaisseurs de réparation supérieures à cette épaisseur seuil (qui dépend de la nature du matériau), l'interface réparation-support n'est pas soumise de façon significative au séchage. Ce comportement hygrométrique spécifique devrait avoir une incidence particulière sur le comportement mécanique et la fissuration du système réparation–support, notamment sur la durabilité de l'adhérence de la réparation et sur la possibilité de décollement (cf. Chapitre 8). Enfin, les résultats des figures 6.10 à 6.12 confirment la sensibilité différente au séchage et au cycles de mouillage-séchage de chacun des matériaux de réparation.

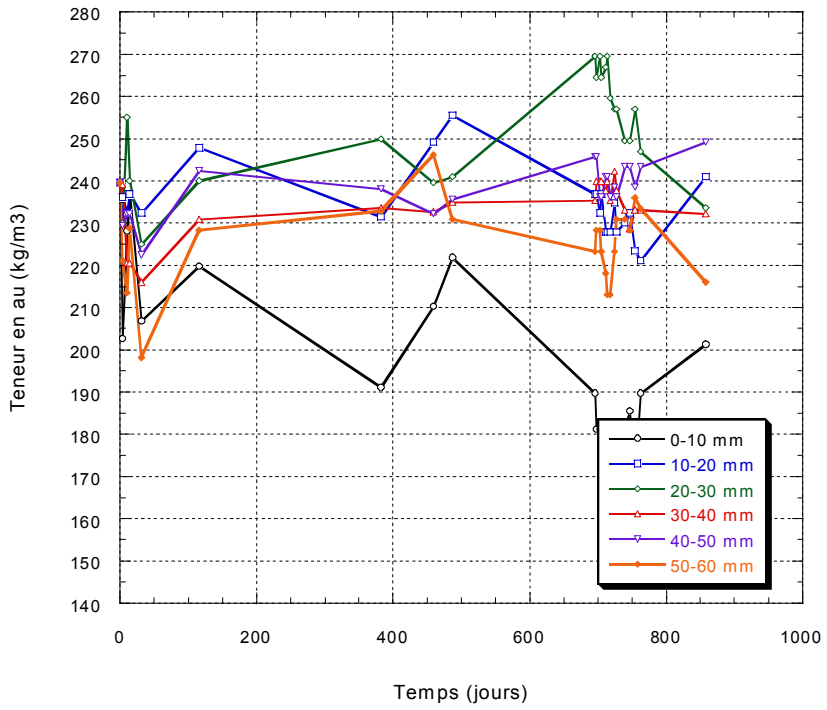


Figure 6.10: Variations relatives de la teneur en eau à différentes profondeurs dans le cas du Mortier Ordinaire

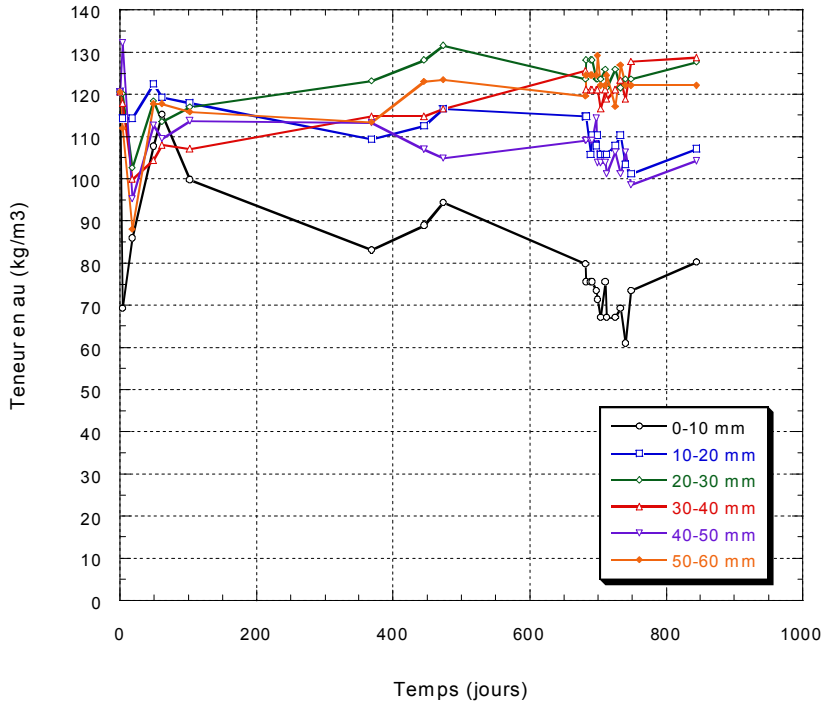


Figure 6.11: Variations relatives de la teneur en eau à différentes profondeurs dans le cas du Béton Ordinaire

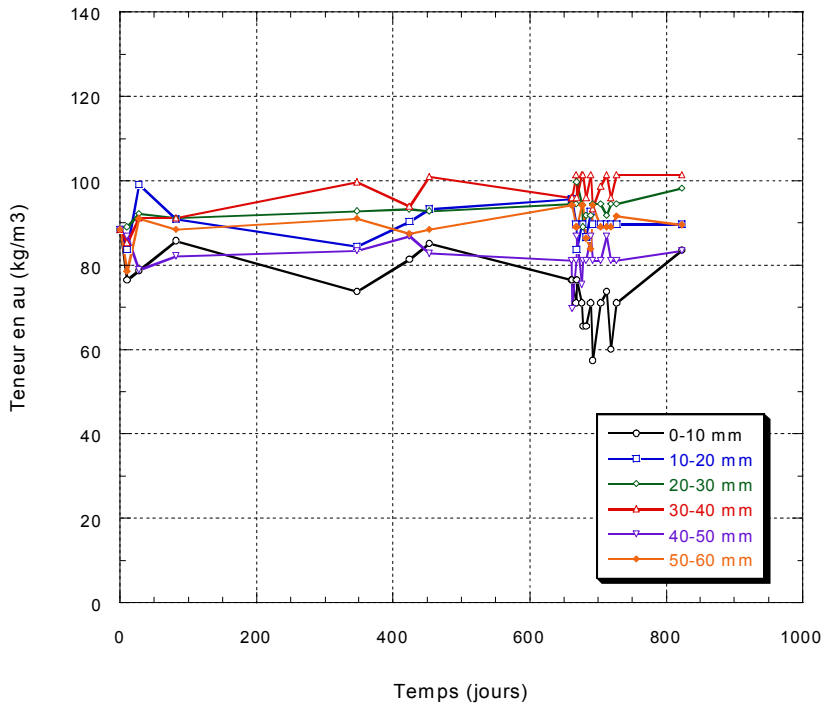


Figure 6.12: Variations relatives de la teneur en eau à différentes profondeurs dans le cas du Béton Hautes Performances

6.2.3 Effet des cycles d'humidité relative sur le séchage des réparations

Il est intéressant d'étudier le comportement hygrométrique des matériaux de réparation sur une échelle de temps de courte durée afin d'observer l'effet des cycles journaliers d'humidité relative et l'effet des cycles de mouillage-séchage. Pour cela, des mesures de pertes de masse à intervalles de temps rapprochés ont été réalisées sur les tranches des différents matériaux de réparation. Les mesures se sont échelonnées de juin à novembre 2000. Les résultats, exprimés sous la forme d'une variation de teneur en eau en fonction du temps, sont présentés sur les figures 6.13 et 6.14. Les valeurs d'humidité relative de l'air ambiant correspondantes sont données en parallèle aux valeurs de variation de teneur en eau.

La figure 6.13 présente la variation de teneur en eau pour les différentes tranches du mortier ordinaire. Les résultats montrent que la tranche correspondant aux premiers 10 mm est celle dont les variations de teneur en eau sous l'effet des cycles d'humidité sont les plus fortes. Ainsi au 70ème jours de suivi, la variation de

teneur en eau devient nulle suite à une augmentation importante de l'humidité. La tranche 10-20 mm suit globalement le même comportement mais avec une sensibilité moindre aux cycles d'humidité. À partir de la tranche 20-30 mm l'effet des cycles n'est quasiment plus perceptible et seul une diminution de la teneur en eau, correspondant au séchage du matériau, est enregistrée. Ces résultats montrent que la profondeur d'action des cycles d'humidité dans la réparation est peu importante et ne dépasse pas dans le cas du mortier ordinaire 30 mm.

La figure 6.14 présente la variation de teneur en eau dans la tranche 0-10 mm pour les différents matériaux. Les résultats montrent que le comportement hygrométrique des matériaux est sensible aux cycles rapides d'humidité relative. En effet, les variations de teneur en eau suivent globalement les variations d'humidité relative et cela, sans inertie significative. Il est également intéressant de remarquer que cette sensibilité de la teneur en eau aux variations d'humidité relative est peu affectée par la nature du matériau. En effet, les variations de teneur en eau enregistrées sont peu différentes entre les 3 matériaux.

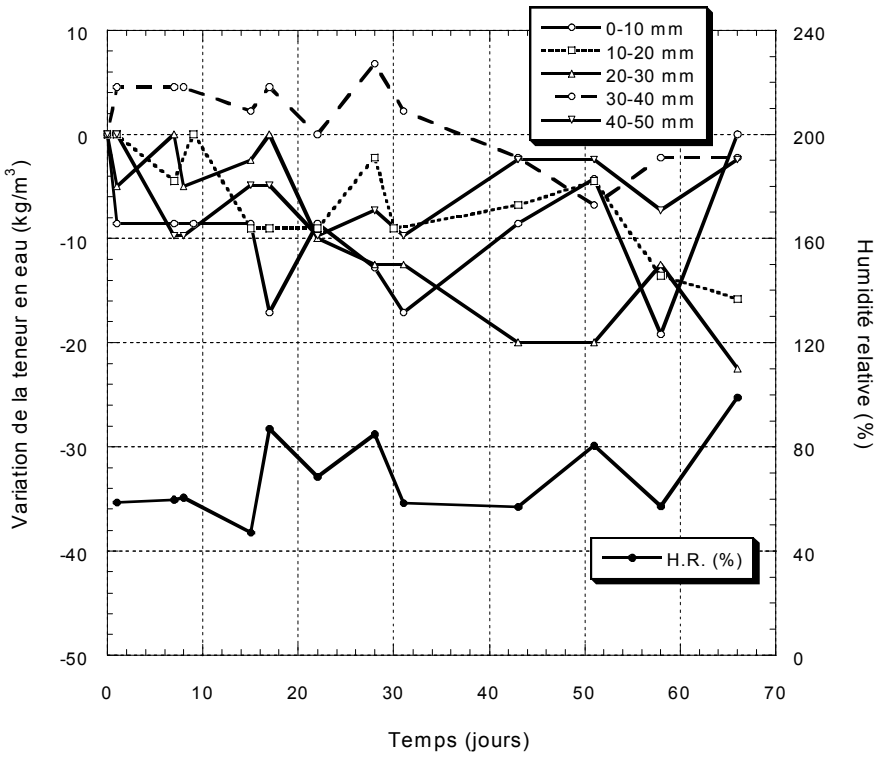


Figure 6.13: Variation de la teneur en eau dans les différentes tranches pour le mortier ordinaire sous l'effet des cycles d'humidité relative

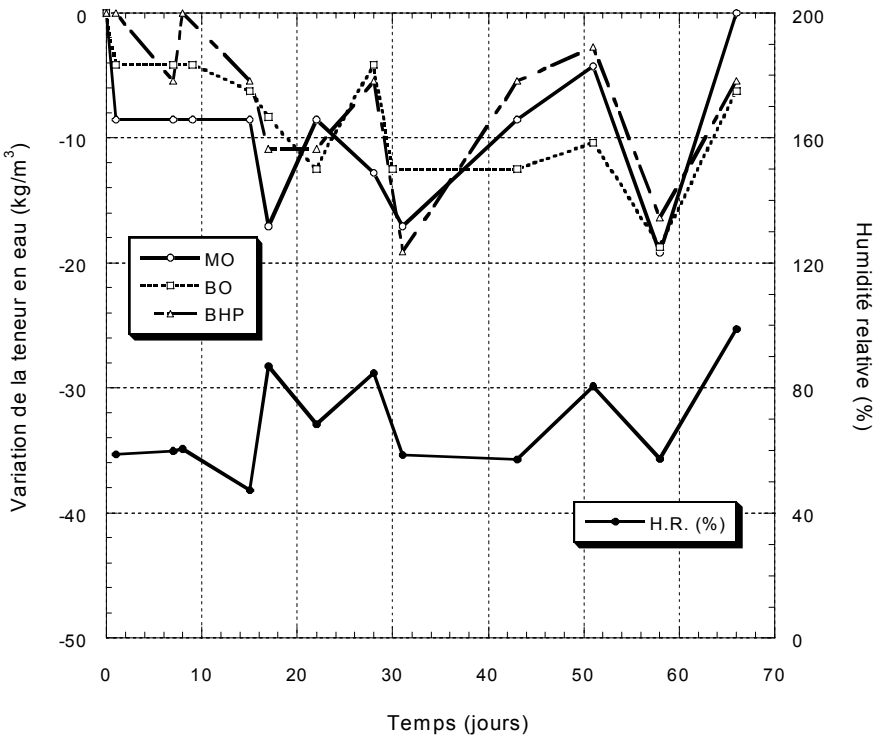


Figure 6.14: Variations de la teneur en eau dans la tranche 0-10 mm pour chacun des matériaux de réparations sous l'effet des cycles d'humidité relative

6.3 DEFORMATIONS LIBRES ET EMPECHEES DUES AU SECHAGE

Dans cette partie, les déformations des matériaux de réparation dues aux conditions climatiques extérieures sont présentées. Comme détaillé dans le Chapitre 4, deux types de mesures ont été réalisés. Tout d'abord, les déformations de plaques de même épaisseur que les réparations et séchant dans les mêmes conditions, mais sans entrave du support, ont été mesurées. Ces déformations sont ainsi appelées "déformations libres". En parallèle, les déformations des matériaux ont été mesurées directement sur les réparations. Du fait de la présence du support, ces déformations sont restreintes. On y référera sous l'appellation "déformations empêchées". La connaissance des températures extérieures a permis de déduire les déformations d'origine thermique de la déformation totale mesurée et ainsi d'accéder à la déformation purement hygrométrique des matériaux.

6.3.1 Déformations libres sur plaques

- Comportement global

Les déformations libres des plaques de 25 mm, 50 mm et 75 mm de chacun des matériaux de réparations sont présentées sur les figures 6.15 et 6.16. Sur ces figures, chaque courbe représente la moyenne des déformations obtenues sur les 2 faces des plaques, elles-mêmes étant la moyenne des déformations obtenues pour chaque paire de jauges de mesure fixées sur les faces latérales des plaques. En effet, les déformations de retrait obtenues pour les 3 paires de jauges positionnées à des profondeurs différentes depuis la surface de séchage ne témoignent pas d'un retrait différentiel. Ce résultat pourrait s'expliquer par un effet compensatoire du poids propre de la plaque sur son "tuilage" engendré par le retrait différentiel entre la surface et le cœur de la plaque. Il pourrait aussi s'agir d'un manque d'efficacité du scellant appliqué sur les faces latérales et sur la face inférieure des plaques afin d'obtenir un séchage unidirectionnel par la face supérieure. Quelques exemples de ce comportement sont présentés en annexe (Annexe 2).

Sur les figures 6.15 et 6.16, les périodes de mesure correspondant à l'été, période au cours de laquelle les mesures étaient effectuées, sont indiquée par des zones ombragées. Au cours de l'été 2000, des mesures de déformations à intervalles de temps rapprochés ont été réalisées afin d'étudier l'influence des cycles d'humidité et des cycles de mouillage-séchage sur les déformations hygrothermiques. Les résultats seront analysés de façon spécifique au paragraphe suivant.

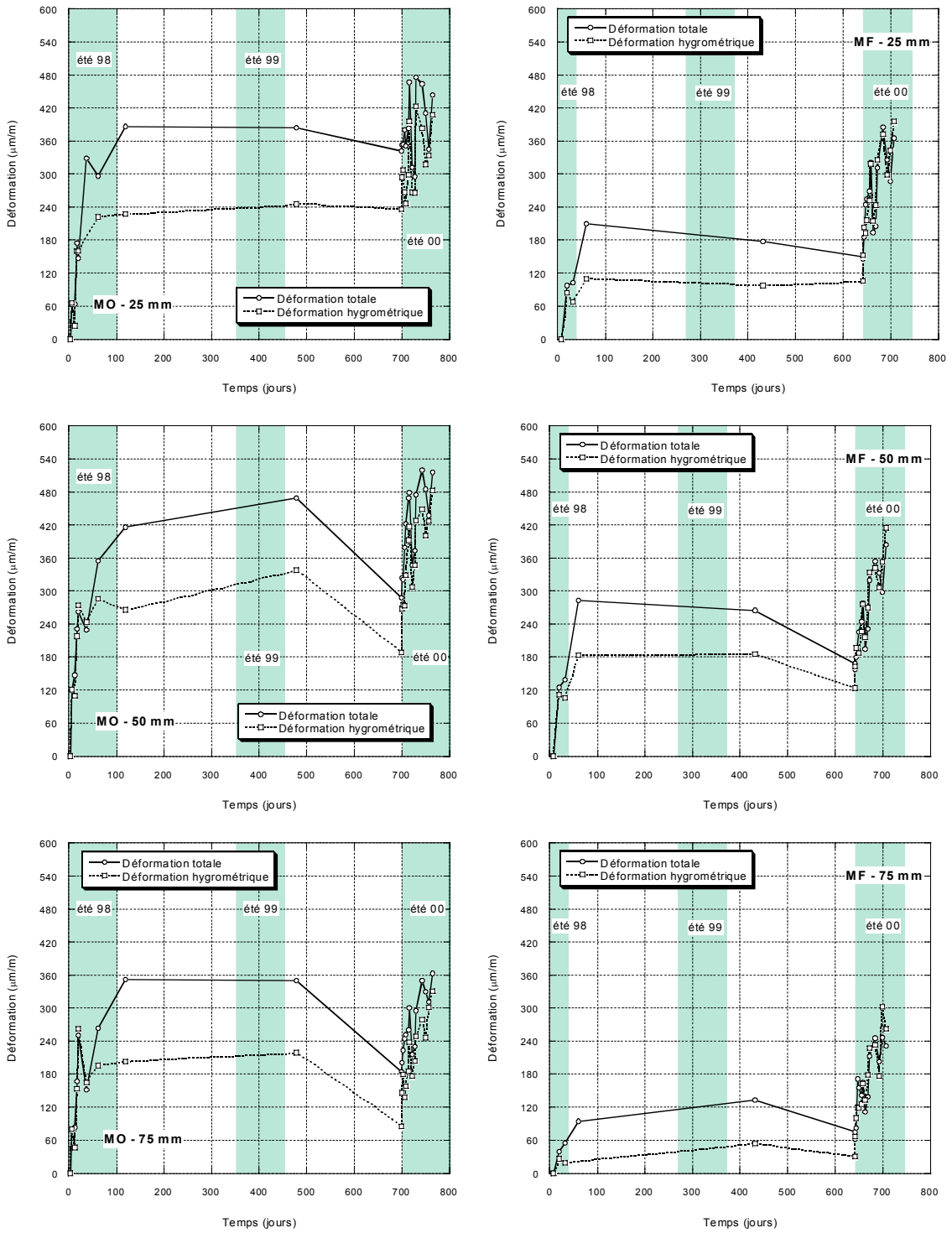


Figure 6.15: Déformations totales et hygrométriques moyennes des plaques en mortier ordinaire et en mortier fibré pour chacune des 3 épaisseurs de recouvrement (zones ombragées: périodes d'été, + :contraction, - :expansion)

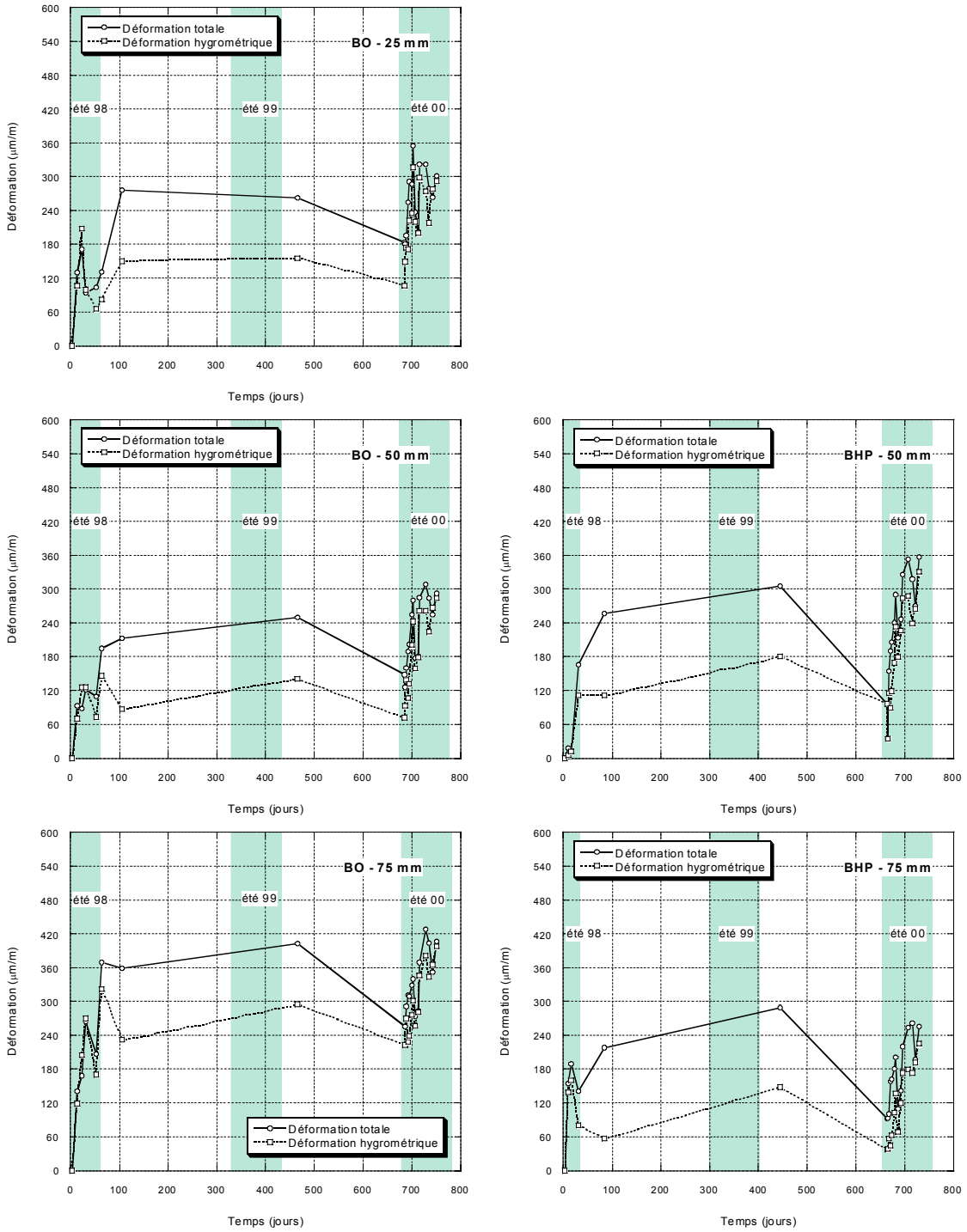


Figure 6.16: Déformations totales et hygrométriques moyennes des plaques en béton ordinaire et en béton hautes performances pour chacune des 3 épaisseurs de recouvrement (zones ombragées: périodes d'été) (données manquantes pour BHP-25 mm)

Globalement, les mesures des déformations in situ montrent que des déformations de retrait significatives sont enregistrées malgré les cycles d'humidité et malgré l'action compensatoire sur le retrait de l'absorption d'eau par les matériaux lors des cycles de mouillage-séchage.

Comme dans le cas des mesures de perte de masse, les déformations de retrait in situ sont différentes en amplitude selon le matériau de réparation. Comme pour les mesures de retrait en ambiance climatique contrôlée à 50% d'humidité relative, le mortier ordinaire est le matériau dont les déformations de retrait in situ sont les plus importantes. Le béton hautes performances est à nouveau le matériau dont les déformations de retrait in situ sont les plus faibles.

Les résultats montrent également que l'épaisseur de la plaque a une incidence sur les déformations de retrait. En effet, les plaques de 75 mm ont développé un retrait moins important que les plaques de 50 mm et surtout que les plaques de 25 mm. Cet effet de l'épaisseur des plaques sur leur retrait a 2 origines. Ce phénomène s'explique tout d'abord en partie par l'effet d'échelle. Cet effet d'échelle sur le retrait de dessiccation résulte directement de l'effet d'échelle sur le séchage. De façon simplifiée, en considérant un matériau élastique parfait, le séchage et le retrait de 2 structures homothétiques d'épaisseur h et αh seront proportionnels avec un rapport α^2. Il faut de plus pour expliquer cet effet de l'épaisseur sur le retrait des plaques considérer l'aspect dissymétrique de leur séchage. Le séchage unidirectionnel des plaques engendre un "tuilage" de la plaque. Ce tuilage est gêné par la rigidité flexionnelle de la plaque qui est directement reliés à son épaisseur. Ainsi, pour un même degré de séchage, plus la plaque est épaisse et plus sa rigidité flexionnelle sera importante et ainsi plus le retrait sera empêché. L'épaisseur de la plaque, et incidemment de la réparation, a donc un effet important non seulement sur le comportement hygrométrique (cf. paragraphe 6.2.1) mais également sur le comportement mécanique.

- Comportement sous l'action des cycles d'humidité et de mouillage-séchage

Il est intéressant d'étudier de façon plus spécifique le comportement des plaques sur un intervalle de temps de courte durée avec des mesures rapprochées afin d'analyser l'action des cycles d'humidité et de mouillage-séchage sur les déformations de retrait. Pour cela, des mesures rapprochées ont été effectuées au cours de l'été 2000. Les résultats sont présentés sur la figure 6.16. Rappelons que sur cette figure, les déformations hygrométriques correspondent aux déformations totales mesurées auxquelles sont retranchées les déformations thermiques

Les résultats montrent que malgré les variations d'humidité relative et les période de mouillage, des déformations de retrait importantes sont mesurées sur l'ensemble de la période de mesure, à savoir les mois de juin et de juillet 2000 (le lecteur pourra se référer aux figures 5 et 6 de l'annexe 1 pour visualiser les variations d'humidité relative correspondant à cette période). Toutefois, les variations d'humidité et les cycles de mouillage-séchage engendrent des variations importantes des déformations sur une période de quelques jours.

Les résultats montrent également que l'épaisseur de la plaque a une incidence sur les déformations de retrait mesurées. L'effet de l'épaisseur sur l'amplitude des déformations des plaques est à nouveau montrée: les plaques de 75 mm se déforment moins que les plaques de 50 mm et, surtout, que les plaques de 25 mm. De plus, l'épaisseur a une influence sur la sensibilité des déformations des plaques aux cycles d'humidité et de mouillage séchage. En effet, l'amplitude des variations de déformation des plaques suite aux variations d'humidité est d'autant plus faible que la plaque est épaisse.

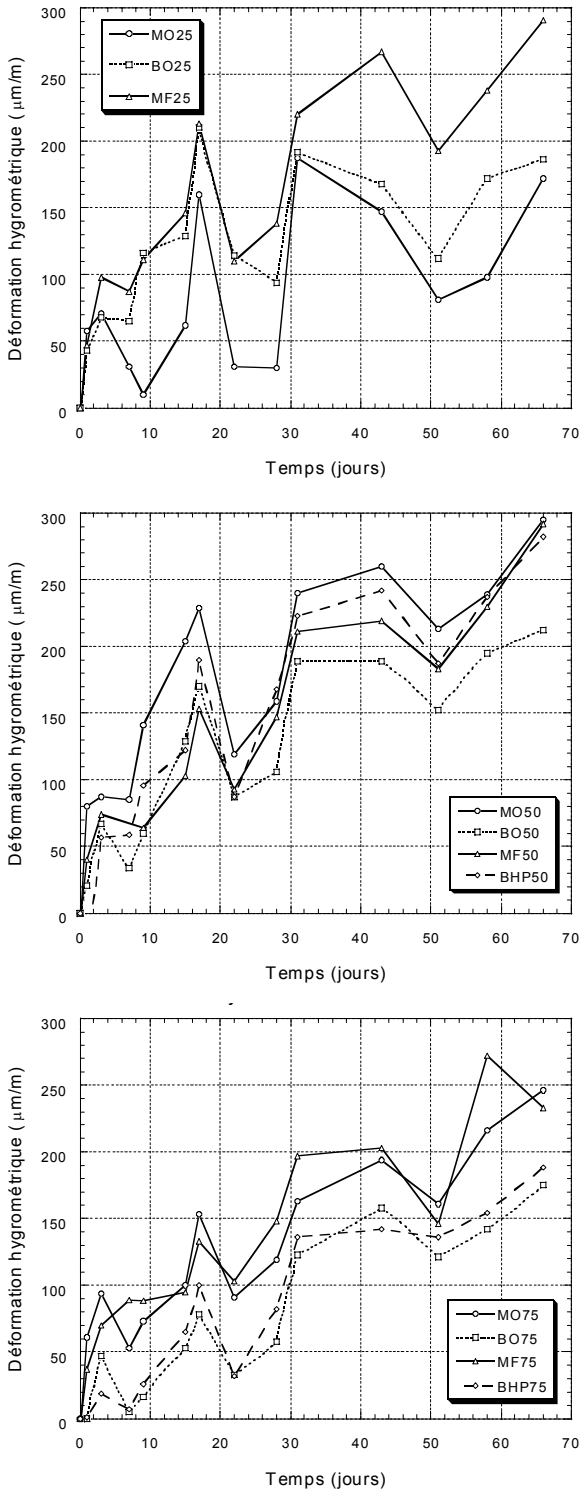


Figure 6.17: Déformations hygrométriques des plaques de matériaux de réparation sous l'action des cycles d'humidité et de mouillage-séchage au cours des mois de juin et juillet 2000 (+ :contraction, - :expansion)

En revanche, comme le montrent les graphiques de la figure 6.17, la nature du matériau a peu d'influence, pour une même épaisseur de plaque, sur la sensibilité des déformations de retrait aux variations d'humidité relative et aux cycles de mouillage-séchage.

6.3.2 Déformations hygrométriques empêchées sur les réparations

Parallèlement au suivi des déformations des plaques, les déformations des réparations ont été mesurées, à même les éléments réparés, de la même façon que pour les plaques. Connaissant les deux types de déformation, libre et empêchée, l'objectif était de calculer la partie restreinte des déformations de retrait des réparations, c'est à dire les déformations qui induisent des contraintes.

- Comportement global

Les résultats des mesures de déformation empêchées sont présentées sur les figures 6.18 et 6.19. Sur ces figures, compte tenu du fait que les paires de plots disposées à différentes profondeurs n'ont pas permis d'observer un gradient de déformation de retrait, seule la moyenne par position est présentée. Il s'agit donc d'une déformation globale de la réparation sous l'action du retrait en conditions de déformations empêchées. Ces figures montrent que le comportement en déformation des réparations est très différent de celui des plaques. Pour un même matériau et une même épaisseur, alors que des déformations de retrait sont enregistrées sur les plaques libres, sur les réparations, le comportement est plus complexe (Figure 6.21). Deux types de comportement sont observés. Le premier est un comportement simple pour lequel des déformations correspondant à un allongement sont enregistrées. Le second est un comportement à deux phases. La première phase correspond au développement de déformations de retrait. La seconde phase succède à la première mais correspond à un allongement allant même dans certains cas au delà de la compensation totale des déformations de retrait initialement mesurées.

Ce comportement pourrait être expliquer de la façon suivante :

De façon quasi systématique, des fissures de retrait empêché sont apparues entre les plots de mesure sur les faces latérales des réparations. Ces fissures perturbent le comportement du matériau et ainsi la mesure des déformations. Lorsqu'une fissure est créée au niveau d'une zone instrumentée par des plots, un relâchement des contraintes de retrait empêché se produit localement ce qui a pour conséquence de relâcher la contraction locale de retrait. La progression du séchage dans le matériau conduit, en dehors de la zone d'action des fissures, au développement du retrait. Cette contraction supplémentaire favorise l'ouverture des fissures initialement créées (jusqu'à ce que d'autres fissures s'initient et relâchent localement les contraintes). L'ouverture de la fissure située dans la base de mesure des déformations peut ainsi induire une déformation correspondant à un allongement. L'allongement n'est pas le fait de l'apparition d'une fissure entre les plots (qui ne fait que relâcher les contraintes et donc annuler la contraction de retrait) mais bien de la poursuite du séchage qui vient ouvrir la fissure.

Dans ce cas, cela revient à peu de chose près à suivre l'évolution de l'ouverture de la fissure. En effet, les allongements mesurés sont de l'ordre de 200 µm/m à 400 µm/m. Les plots de mesure étant espacés de 12,7 cm (5 pouces), cela correspondrait à une ouverture de fissure de l'ordre de 25 µm à 50 µm. C'est à dire à des ouvertures de fissures du même ordre que ce qui a été mesurée en surface des réparations (cf. Chapitre 8).

Dans certains cas, la fissuration est apparue très tôt et un allongement est rapidement obtenu (comportement de type 1). Dans d'autres cas, la fissuration est apparue plus tardivement, ce qui a conduit à l'obtention de déformations de retrait au début de l'essai puis à un inversion du phénomène avec l'apparition d'un allongement qui dans certains cas compense en totalité les déformations de retrait survenues antérieurement (comportement à 2 phases de type 2).

- Influence de la nature du matériau de réparation

Le comportement en déformation des réparations est différent selon la nature du matériau de réparation. Le mortier ordinaire est le matériau dont le

comportement se démarque le plus. En effet, ce matériau a rapidement développé des déformations de retrait importantes et des fissures sont apparues très tôt entre les plots de mesure. Les déformations enregistrées pour ce matériau correspondent donc presque systématiquement à un allongement. Comme le montre la figure 6.18, le mortier fibré a développé un comportement sensiblement différent. Même si la matrice de ce matériau est identique à celle du mortier ordinaire, la présence de fibres d'acier en volume important a permis de différer l'apparition des fissures de retrait (des fissures ont été repérées 1 an seulement après la mise en place des réparations (cf. Chapitre 8)). Des déformations correspondant à un allongement sont seulement mesurées deux ans après la mise en œuvre du mortier fibré, c'est-à-dire au cours de l'été 2000, période où la fissuration du mortier fibré s'est beaucoup développée.

Le béton ordinaire et le béton hautes performances, dont les déformations sont rapportées à la Figure 6.19, se sont comportés de façon similaire. Ces deux matériaux ont fissuré plus tardivement que le mortier ordinaire. Un comportement de type 2 avec deux phases est observé dans tous les cas. Après 2 ans, la déformation résultante mesurée n'est pas systématiquement un allongement. Ce résultat reflète bien la sensibilité moindre des deux bétons face au retrait, et donc à la fissuration, comparativement au mortier ordinaire.

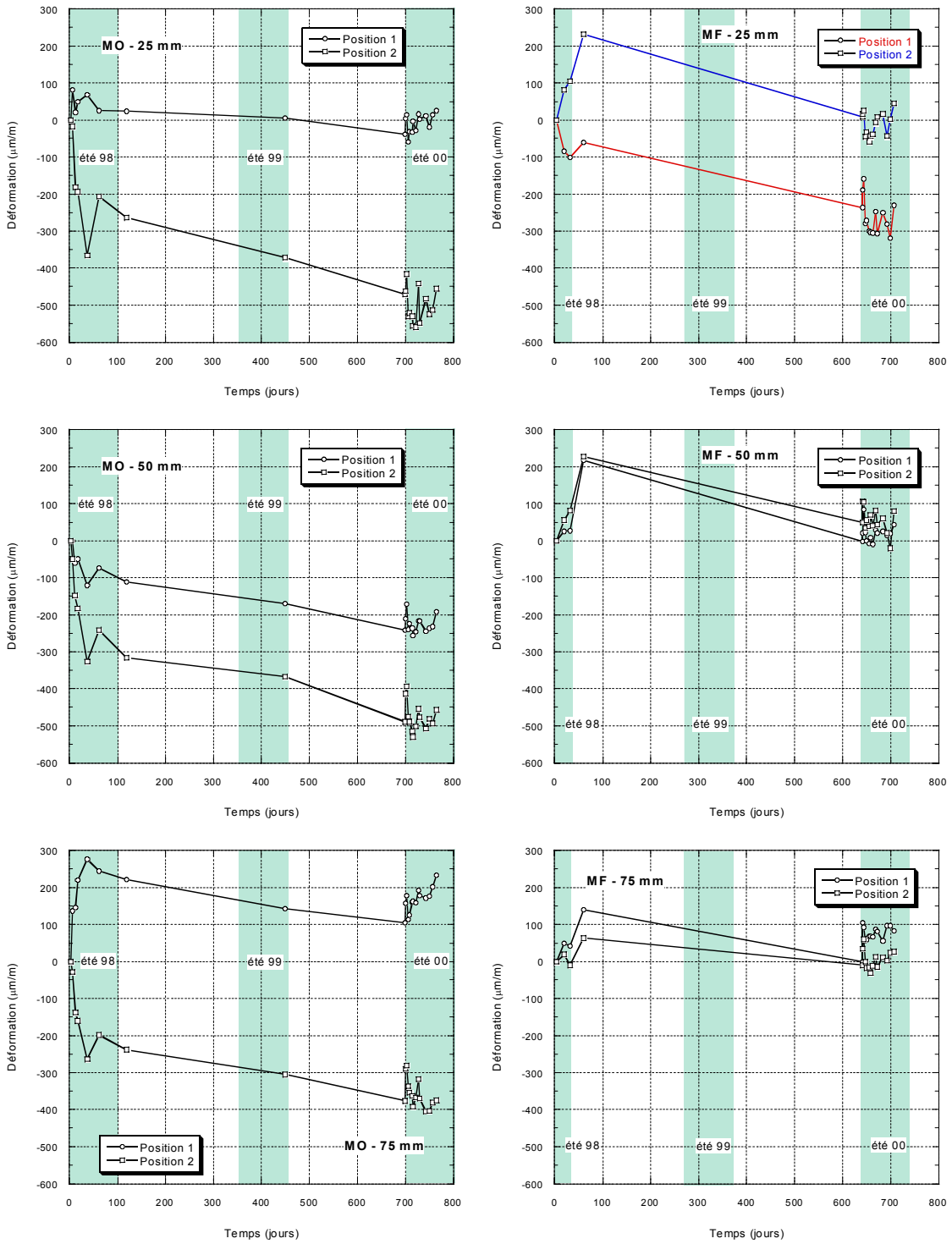


Figure 6.18: Déformations hygrométriques moyennes par position des plots pour les réparations en mortier ordinaire et en mortier fibré pour chacune des 3 épaisseurs de recouvrement (+ :contraction (retrait), -:expansion, position 1 ou 2 : cf. Chap. 4/figure 4.10)

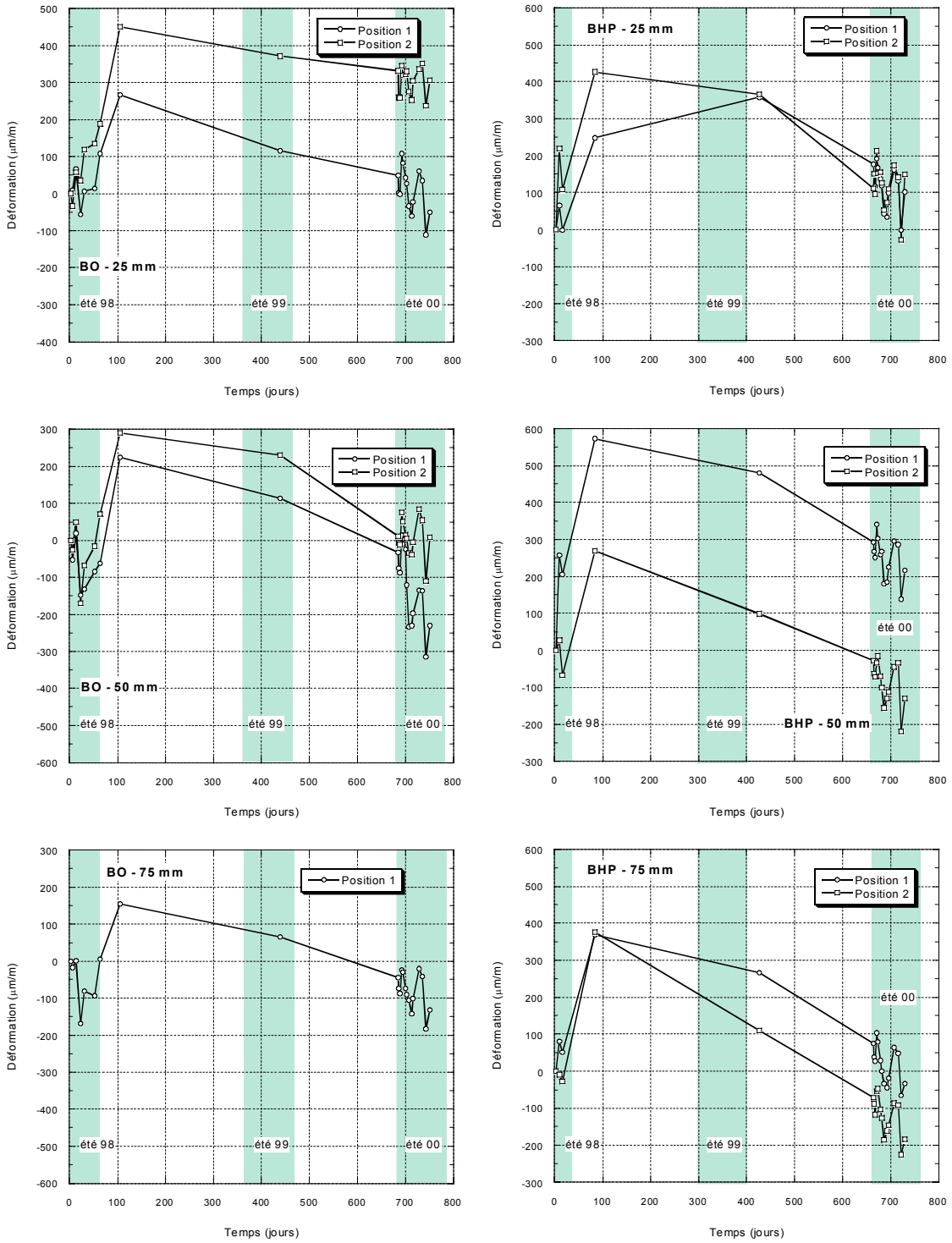


Figure 6.19: Déformations hygrométriques moyennes par position des plots pour les réparations en béton ordinaire et en béton hautes performances pour chacune des 3 épaisseurs de recouvrement (+ :contraction (retrait), -:expansion, position 1 ou 2 : cf. Chap. 4/schéma p72)

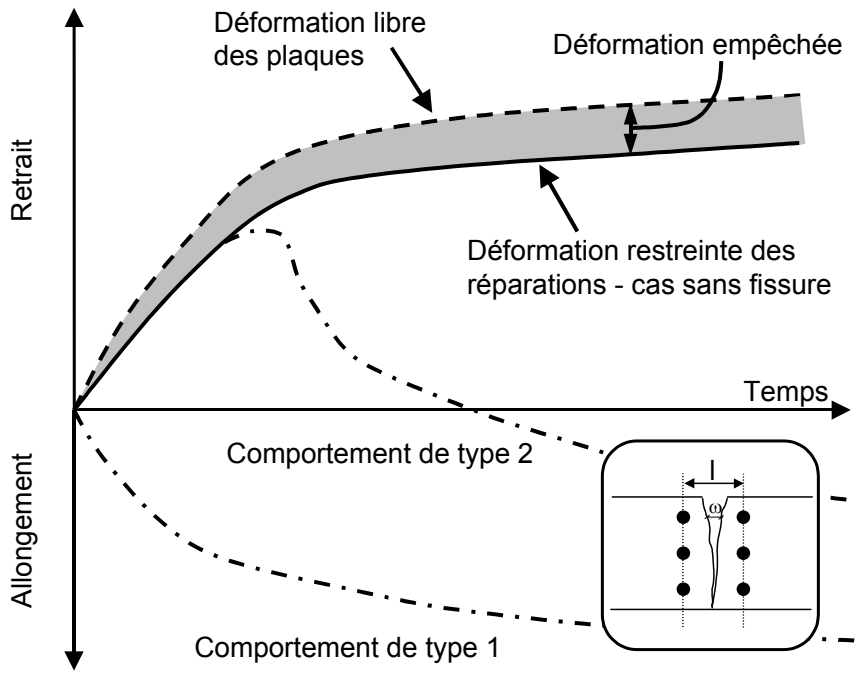


Figure 6.20: Schéma illustrant le comportement en déformation des plaques et des réparations (l: base de mesure des déformations, w: ouverture de fissure)

6.4 SYNTHESE ET CONLUSIONS

Ce chapitre était consacré à l'étude du comportement hygrométrique des réparations in situ. Tout d'abord, il a été montré qu'en conditions climatiques réelles, à savoir en présence de cycles d'humidité et de cycles de mouillage-séchage, une profondeur seuil de séchage existe. Dans les conditions de la présente étude expérimentale et pour la durée de suivi considérée (2 ans), cette épaisseur est de l'ordre de 30 mm pour les deux mortiers et le béton ordinaire et de 10 mm pour le béton hautes performances. Le séchage dans de telles conditions ne peut donc pas affecter directement l'interface des réparations de 50 mm et de 75 mm d'épaisseur. Ce résultat devra être confronté aux résultats de fissuration interne des réparations (cf. Chapitre 9).

Il a également été montré que, malgré les cycles de mouillage-séchage et les variations d'humidité relative, des déformations de retrait importantes sont induites par le séchage global des matériaux de réparation. Ces déformations, lorsqu'elles sont restreintes par la présence d'un support, conduisent à la

fissuration du matériau. La partie empêchée des déformations n'a pas pu être calculée à partir des mesures des déformations libres sur plaques du fait de l'apparition de fissures qui ont perturbée les mesures de déformation sur les réparations. Les mesures de déformation sur les réparations montrent malgré tout que les fissures ont, dans la majorité des cas, relaxé localement les contraintes de retrait empêché puisqu'elles conduisent à terme, lorsqu'elles apparaissent entre les plots de mesure, à des déformations correspondant à un allongement. La poursuite de cet allongement après l'apparition des fissures montre également que les réparations ne sont toujours pas, après 2 ans, en équilibre hygrométrique avec le milieu extérieur et que l'ouvertures des fissures continue à évoluer suite à la progression du séchage dans la réparation.

L'ensemble de ces résultats sur le comportement hygrométrique des réparations devront être corrélés avec les résultats de l'étude sur leur comportement mécanique (adhérence, fissuration) afin de réaliser une analyse globale du comportement hygro-mécanique des réparations.

CHAPITRE 7

ADHERENCE DES REPARATIONS

Ce chapitre présente les résultats des essais d'adhérence qui ont été conduits sur les réparations. Des essais d'adhérence ont été réalisés pour les 4 matériaux de réparation et pour les 3 épaisseurs de recouvrement. Afin d'évaluer la durabilité de cette adhérence, les essais ont été menés aux échéances de 28 jours, 1 an et 2 ans. Pour chaque condition d'essai, 6 éprouvettes ont été testées. Un traitement statistique a ainsi pu être réalisé afin de rendre compte de la dispersion liée à la mesure de cette propriété et afin d'en évaluer la pertinence.

7.1 CARACTERISATION DE L'ADHERENCE

Afin de quantifier l'adhérence des réparations à leur support, des essais d'arrachement par traction ont été réalisés. Pour plus de détails sur les aspects techniques des essais, le lecteur pourra se reporter au Chapitre 4. Rappelons simplement que ces essais ont été menés sur des éprouvettes cylindriques de 100 mm de diamètre carottées au droit des réparations de façon à obtenir des éprouvettes composites englobant le matériau de réparation et celui du support.

7.1.1 Critère de rupture

Pour chaque essai de traction conduit sur une éprouvette composite, le faciès de rupture est examiné. L'objectif étant de quantifier la résistance du "collage" du matériau de réparation à son support, seul les essais ayant conduit à une rupture à l'interface entre la réparation et le support sont comptabilisés. Dans les conditions de l'étude, pour laquelle les supports ont subi une préparation de surface mécanique, une rupture parfaite à l'interface, c'est à dire lorsque les 2 matériaux sont totalement séparés, est très rarement obtenue. Pour déterminer le type de rupture obtenu pour chaque essai, le critère suivant a donc été fixé: une

rupture à l'interface est obtenue lorsque de la pâte et/ou des granulats de chacun des 2 matériaux sont visibles sur chacune des faces du plan de rupture de l'éprouvette. Un exemple d'éprouvette répondant à ce critère et donc considéré comme une rupture à l'interface est présenté sur la Figure 7.1.

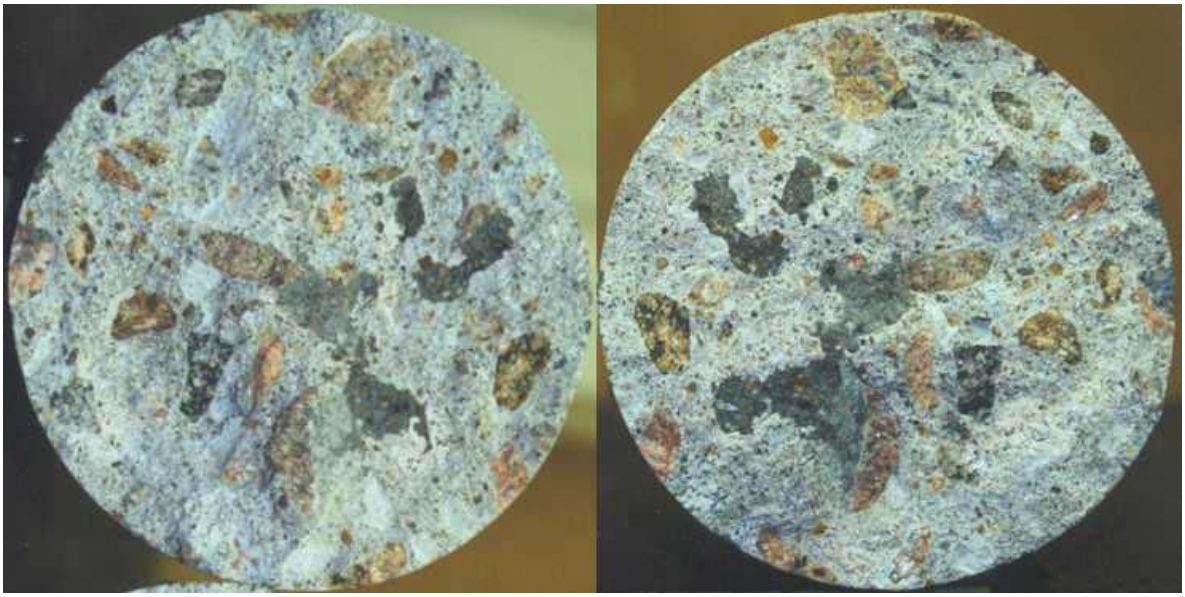


Figure 7.1: Exemple de faciès de rupture obtenu répondant au critère fixé (zones gris clair: support, zones gris foncé: réparation)

Les essais n'ayant pas répondu au critère de rupture ainsi fixé ne sont pas pris en compte dans le calcul de l'adhérence. Pour chaque série de 6 éprouvettes testées, cela est parfois arrivé compte tenu de la présence de certains défaut venant perturber la qualité de l'interface tels que les vides de compaction ou les fissures initiales de préparation de surface. Cependant, dans la majorité des cas, une rupture répondant au critère de rupture à l'interface a été obtenue. Cela montre que le collage béton-béton constitue une zone de propriétés mécaniques moindre par rapport au matériaux mis en contact. Il s'agit donc véritablement d'un plan de faiblesse au sein de la structure composite.

7.1.2 Analyse et choix du type d'essai de traction

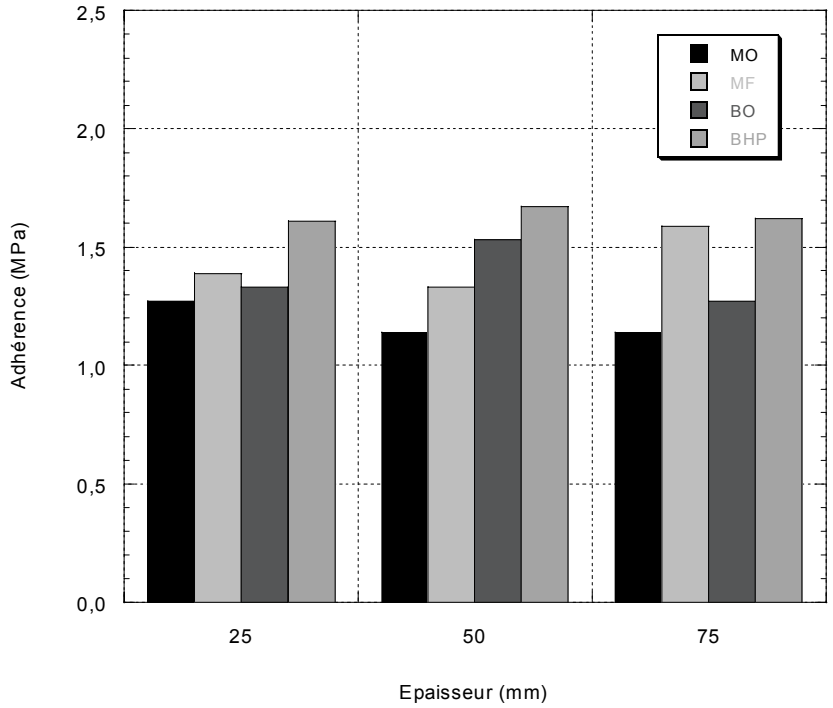
Deux types d'essais de traction ont été réalisés pour évaluer l'adhérence des réparations à leurs supports: un essai d'arrachement réalisé in situ, communément appelé "pulloff strength test" (norme ASTM C900) et un essai de

traction directe réalisé en laboratoire (cf. Chapitre 4 pour la description technique des essais). Afin de procéder à l'analyse des résultats en vue d'évaluer l'adhérence des réparations et la durabilité de celle-ci, il a fallu faire un choix parmi les résultats de ces deux essais très différents sur le plan mécanique.

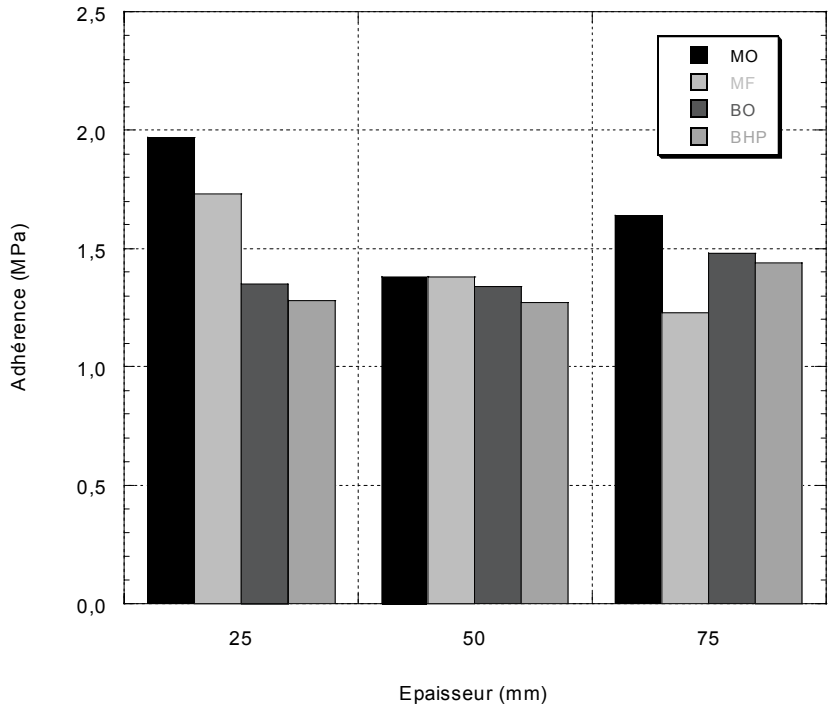
Les valeurs d'adhérence obtenues à partir des deux types d'essai pour l'échéance initiale de 28 jours sont présentées à titre d'exemple sur la figure 7.2. Le tableau 7.1 présente, selon les deux types d'essai, le nombre de rupture répondant au critère de rupture à l'interface obtenues pour chaque série de 6 essais effectués. Le tableau 7.1 donne ainsi le nombre d'éprouvettes ayant servi au calcul des moyennes présentées sur les figures 7.2(a) et 7.2(b).

Tableau 7.1: Nombre de rupture à l'interface obtenues à 28 jours selon les deux type d'essai, pour les 4 matériaux et selon les 3 épaisseurs de réparation

Épaisseur	Matériau	Arrachement	Traction directe
25 mm	MO	4	4
	MF	6	5
	BO	3	6
	BHP	3	6
50 mm	MO	4	4
	MF	5	4
	BO	4	4
	BHP	2	5
75 mm	MO	4	5
	MF	6	5
	BO	5	6
	BHP	5	6



(a)



(b)

Figure 7.2: Adhérence moyenne des réparations à l'échéance de 28 jours (a):résultats de l'essai d'arrachement, (b):résultats de l'essai de traction directe

Les figures 7.2(a) et 7.2(b) montrent que les ordres de grandeur des valeurs d'adhérence obtenues par les deux essais sont similaires, mais que les tendances sont différentes selon les épaisseurs et les matériaux testés. De plus, les résultats présentés dans le tableau 7.1 indiquent que le nombre d'essais répondant au critère de rupture à l'interface est plus faible dans le cas de l'essai d'arrachement. En se basant sur des considérations mécaniques, il a été décidé de se fier aux résultats des essais de traction directe pour analyser les résultats qui seront présentés dans la suite du chapitre. Les raisons à l'origine de ce choix sont développées au paragraphe suivant.

L'essai de traction directe a spécialement été conçu pour solliciter véritablement en traction l'éprouvette. D'une part, les casques ont été dimensionnés de façon à éviter toute concentration de contrainte et ainsi à en permettre une répartition homogène sur toute la hauteur de l'éprouvette (Figure 7.3(a)). D'autre part, l'emploi d'aluminium a permis de réduire le frettage entre les casques et le béton dans la mesure où ces deux matériaux ont des coefficients de Poisson similaires. Enfin, la rectification des faces de collage des éprouvettes et la mise en place automatique des casques sur le matériau à l'aide de la machine d'essai permettent un alignement précis de l'axe de charge avec l'axe de symétrie de l'éprouvette. Tout cela permet de réaliser un essai de traction fiable et dont la variabilité ne dépend quasiment que de l'hétérogénéité du matériau ou des éprouvettes (notamment de la géométrie du plan d'interface).

L'ensemble de ces conditions favorables ne se retrouve pas dans le cas de l'essai d'arrachement réalisé in situ. D'une part, la non-rectification des éprouvettes et le collage manuel des casques ne garantissent pas un bon parallélisme des faces et un bon alignement de l'axe de charge et de l'axe de symétrie de l'éprouvette. Bien sûr, la présence d'une rotule au point d'application de la charge permet une certaine correction des défauts ainsi engendrés, mais jamais à 100% (Figure 7.3(b)). D'autre part, les casques n'ont pas été dimensionnés pour répartir de façon homogène les contraintes dans la hauteur de l'éprouvette. En effet, leur hauteur n'est que de quelques centimètres et l'acier dont ils sont constitué favorise le frettage au niveau du collage.

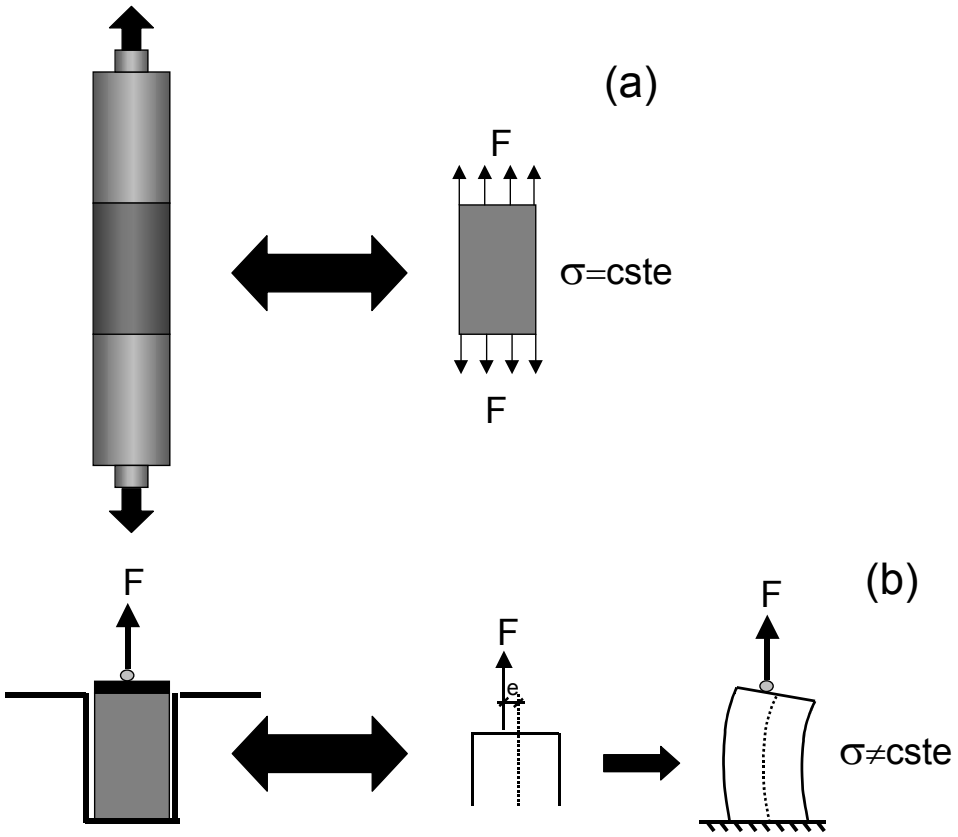


Figure 7.3: Analyse mécanique des deux essais de traction ((a): traction directe, (b): arrachement in situ)

L'ensemble de ces "défauts" explique pourquoi un nombre d'essais important se sont soldés par une rupture au plan de collage de l'éprouvette avec le casque ou encore dans le support. Dans pareil cas, il n'est pas possible de conclure quant à la résistance du collage des deux matériaux, puisqu'un tel essai, rotulé en partie supérieure, encastré en partie inférieure et avec la possibilité d'un défaut d'alignement, ne permet pas une répartition homogène des contraintes sur toute la hauteur de l'éprouvette.

7.1.3 Analyse statistique des résultats d'essai de traction

Les résultats des essais de traction sur éprouvettes composites sont très variables en particulier dans les conditions de l'étude pour lesquelles la préparation de surface mécanique employée a conduit à un plan de collage réparation/support

désordonné géométriquement c'est à dire avec une macrorugosité importante (cf. figure 4.5 Chapitre 4). Ces conditions de surface sont donc loin des conditions optimales de collage entre 2 surfaces planes. La variabilité de l'état de surface et la présence potentielle de défauts (fissuration mécanique initiale, vide de remplissage, bulle d'air, etc.) rendent les valeurs d'adhérence obtenues variables par "nature" malgré la fiabilité de l'essai de traction directe. Un traitement statistique a donc été réalisé sur chaque famille de résultats afin de tenir compte de la dispersion des valeurs d'adhérence obtenues. Ce traitement a consisté à associer un intervalle de confiance à chaque adhérence moyenne calculée. Les bornes inférieures et supérieures de cet intervalle de confiance sont déterminées en se basant sur une loi de Student avec un niveau de probabilité de 95 %.

7.2 ADHERENCE INITIALE DES REPARATIONS

La première mesure de l'adhérence des réparations à leur support a été conduite 28 jours après la mise en place du matériau de réparation. Cette valeur d'adhérence constitue une valeur de référence pour la suite de l'étude. En effet, 28 jours est d'une part une durée suffisante pour que l'hydratation du ciment soit bien avancée et donc pour que l'adhérence de la réparation soit bien développée. D'autre part, à cette échéance, le séchage ne devrait pas encore atteindre l'interface réparation/support et ne devrait donc pas en perturber les propriétés mécaniques. Les résultats d'adhérence issus des essais de traction directe à 28 jours sont présentés sur la figure 7.2(b). Les valeurs moyennes associées à leur intervalle de confiance sont présentées au tableau 7.2.

Tableau 7.2: Adhérence moyenne et intervalle de confiance associé pour l'échéance de 28 jours (résultats issus de l'essai de traction directe)

	Adhérence moyenne (MPa)
MO-25	1,97 ± 0,41
MO-50	1,38 ± 0,25
MO-75	1,64 ± 0,09
MF-25	1,73 ± 0,25
MF-50	1,38 ± 0,24
MF-75	1,23 ± 0,14
BO-25	1,35 ± 0,09
BO-50	1,34 ± 0,30
BO-75	1,48 ± 0,48
BHP-25	1,28 ± 0,36
BHP-50	1,27 ± 0,34
BHP-75	1,44 ± 0,35

7.2.1 Influence de la nature du matériau de réparation

Les résultats présentés sur la figure 7.2(b), associés aux intervalles de confiance résumés dans le tableau 7.2, montrent qu'après 28 jours d'hydratation et d'exposition aux conditions climatiques extérieures, la nature du matériau de réparation n'a pas d'influence significative sur l'adhérence des réparations. Si la matrice cimentaire est considérée comme étant à l'origine de l'adhérence développée entre la réparation et son support, deux facteurs propre au matériau pourraient en influencer l'intensité: la qualité de matrice cimentaire et le volume de pâte. Parmi les 4 matériaux de réparation utilisés dans l'étude, les deux mortiers ont un volume de pâte plus important que les deux bétons. Ce volume de pâte plus important n'a cependant pas conduit à l'obtention d'une adhérence plus élevée. Enfin, le béton hautes performances est constitué d'une matrice de meilleure qualité que celle des deux mortiers et du béton ordinaire. Cette meilleure qualité de matrice, apportée par un rapport eau/ciment plus faible et la présence de fumée de silice, n'a cependant pas permis l'obtention d'une adhérence plus importante.

7.2.2 Effet de l'épaisseur de réparation

Comme le montrent les résultats de la figure 7.2(b) complétés par ceux du tableau 7.2, à l'échéance de 28 jours, l'épaisseur des réparations n'a pas d'influence sur l'adhérence développée entre les réparations et leur support. Ce résultat était attendu dans la mesure où, après 28 jours d'exposition aux conditions climatiques extérieures, l'adhérence développée correspond à une adhérence "intrinsèque" du système matériau de réparation/support. En effet, à cette échéance, l'effet d'échelle n'influence vraisemblablement l'adhérence développée que dans une faible mesure, le séchage étant encore très superficiel.

7.3 DURABILITE DE L'ADHERENCE DES REPARATIONS

L'adhérence développée à 28 jours est une propriété importante, mais n'est pas suffisante pour garantir la pérennité du système mécanique réparation/support. En effet, une adhérence initiale élevée n'en garantit pas la durabilité. C'est pourquoi des mesures d'adhérence ont été réalisées sur chacune des réparations aux échéances de 1 an et de 2 ans. Après de telles durées d'exposition aux conditions climatiques extérieures, la résistance du collage du matériau de réparation à son support est susceptible d'évoluer suite aux actions combinées du séchage, du retrait et éventuellement de la fissuration qui pourrait en découler.

Les résultats des essais de traction directe aux échéances de 28 jours, 1 an et 2 ans sont rassemblés et présentés pour chaque matériau suivant les 3 épaisseurs de recouvrement sur les figures 7.4 à 7.7. Pour chaque point de mesure, un intervalle de confiance avec un niveau de probabilité de 95 % est associé.

7.3.1 Influence de la nature du matériau de réparation

Les 4 matériaux de réparation ayant des comportements au séchage différents et développant des déformations de retrait d'amplitude différente (cf. Chapitre 5 et 6), les chargements subis par les différents systèmes réparation/support sont

différents. Pour une même épaisseur de recouvrement, ces différences de comportement peuvent engendrer une évolution différente de l'adhérence.

Dans les conditions de l'étude, comme le montrent les Figures 7.4 à 7.7, aucun matériau de réparation n'a subi une baisse significative de l'adhérence. Il est arrivé qu'une baisse soit enregistrée après 1 an, mais la tendance s'est en général inversée à l'échéance suivante de 2 ans. De plus, les baisses d'adhérence obtenues sont dans la majorité des cas trop faibles pour être considérées comme significatives compte tenu de l'amplitude des intervalles de confiance associés.

La nature du matériau de réparation n'a donc pas eu, dans le cadre de l'étude présentée, d'influence significative sur la durabilité de l'adhérence initialement développée à l'échéance de 28 jours. Même l'emploi de matériaux dont les déformations de retrait sont très importantes, comme les deux mortiers, n'a pas conduit à une durabilité moindre de l'adhérence.

7.3.2 Effet de l'épaisseur de réparation

Le séchage et le retrait des matériaux cimentaires sont des phénomènes physiques soumis à d'importants effets d'échelle. De plus, dans les conditions d'un séchage in situ, une épaisseur seuil semble exister au-delà de laquelle le séchage devient inexistant, pour la durée d'exposition considérée. Selon l'épaisseur de la réparation, si le séchage a une influence sur la durabilité de l'adhérence des réparations, il est donc envisageable que l'évolution de l'adhérence en fonction du temps soit différente.

Les résultats des essais d'adhérence montrent que, dans le cas de la présente étude, l'épaisseur de réparation n'a pas d'effet sur la durabilité de l'adhérence. Même pour les réparations de 25 mm, c'est à dire les réparations dont l'épaisseur est inférieure à l'épaisseur seuil de séchage (sauf apparemment pour le béton hautes performances), aucune baisse d'adhérence significative n'a été enregistrée.

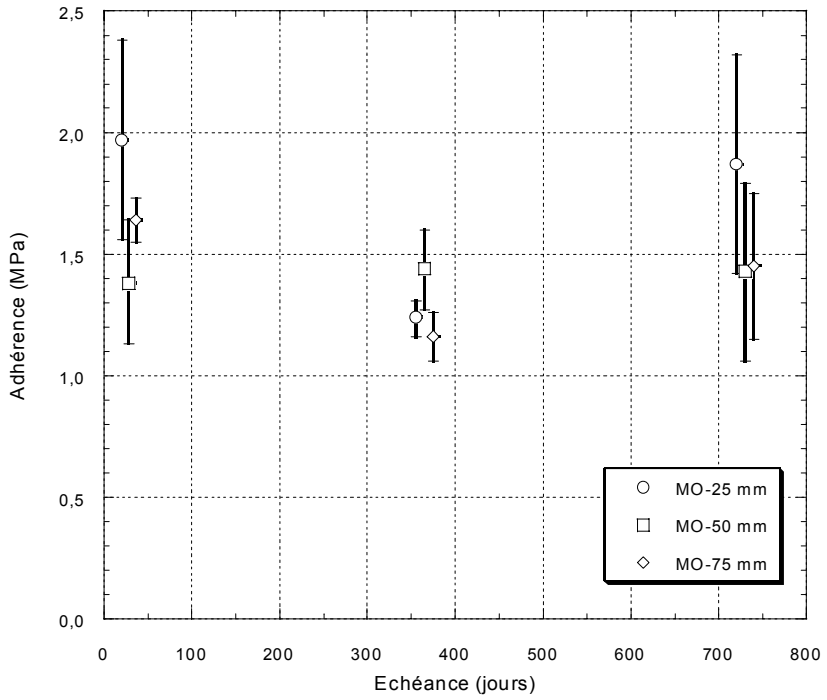


Figure 7.4: Évolution de l'adhérence des réparations en mortier ordinaire

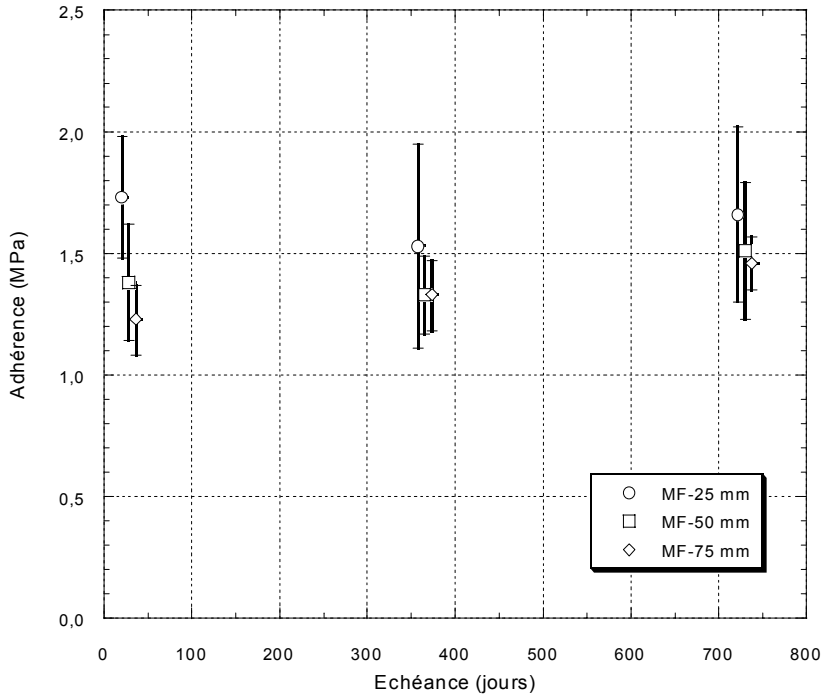


Figure 7.5: Évolution de l'adhérence des réparations en mortier fibré

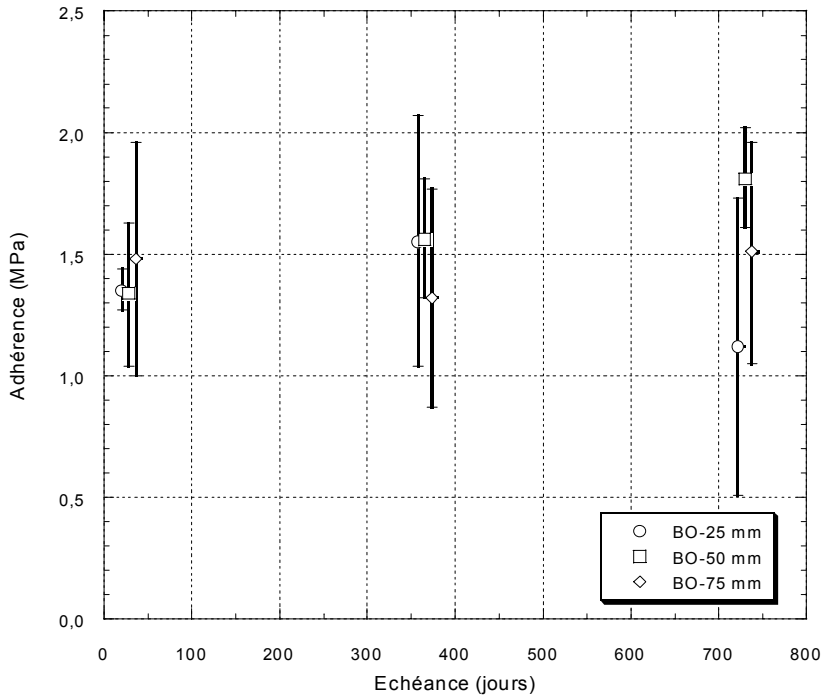


Figure 7.6: Évolution de l'adhérence des réparations en béton ordinaire

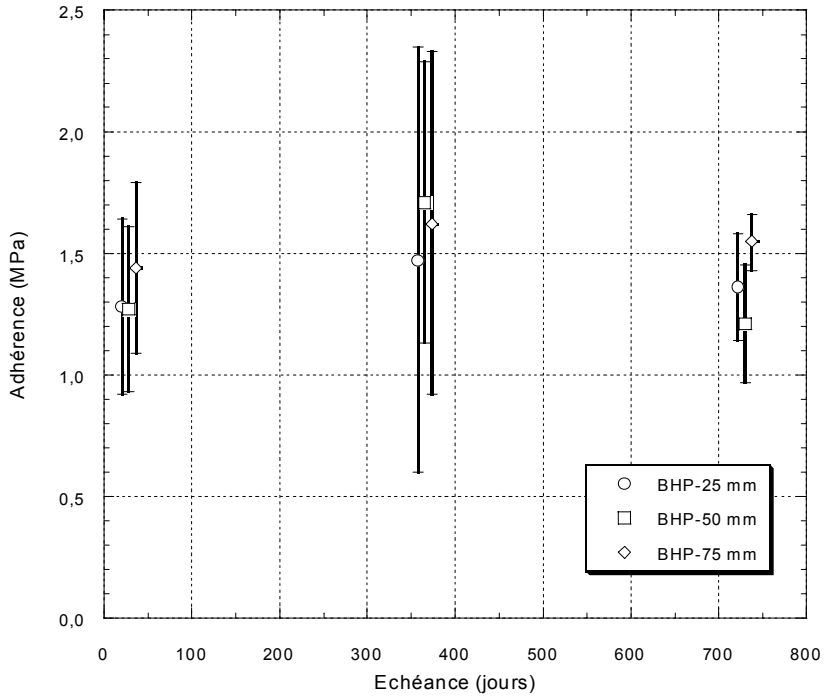


Figure 7.7: Évolution de l'adhérence des réparations en béton hautes performances

7.3.3 Influence de la fissuration sur l'adhérence

Afin d'étudier l'influence de la fissuration du matériau de réparation sur l'adhérence du système réparation/support, parmi les éprouvettes de traction directe testées à 28 jours, 1 an et 2 ans, certaines ont été prélevées au droit de fissures de retrait visibles en surface. L'adhérence moyenne obtenue sur les éprouvettes fissurées a ainsi pu être comparée à l'adhérence moyenne obtenue sur les éprouvettes non fissurées. Les résultats obtenus dans le cas des réparations en mortier ordinaire sont présentés dans le tableau 7.3. avec indication du nombre d'éprouvettes testées correspondant.

Tableau 7.3: Comparaison de l'adhérence obtenue aux différentes échéances sur éprouvettes avec et sans fissure de retrait (cas des réparations en mortier ordinaire)(NF: éprouvettes non fissurées, F: éprouvettes fissurées)

échéance	28 jours		1 an		2 ans	
	NF	F	NF	F	NF	F
MO-25 mm	1.97 (3)	1.23 (1)	1.26 (3)	1.20 (2)	1.87 (4)	-
MO-50 mm	1.21 (2)	1.57 (2)	1.47 (4)	1.32 (1)	1.45 (3)	1.32 (1)
MO-75 mm	1.56 (2)	1.69 (3)	1.06 (2)	1.19 (3)	1.49 (3)	1.32 (1)

Comme le montrent les résultats du tableau 7.2, l'adhérence obtenue sur les éprouvettes avec fissure n'est pas systématiquement inférieure à celle obtenue sur les éprouvettes sans fissure. La première possibilité serait que les fissures de surface observées sur les éprouvettes sont superficielles et n'atteignent pas l'interface entre la réparation et le support à l'échéance considérée. La seconde possibilité serait que les fissures atteignent effectivement l'interface, voire même la traverse, sans toutefois être orientées de façon à constituer une forme d'endommagement pouvant affecter la résistance du collage entre le matériau de réparation et son support. En effet, une fissure perpendiculaire au plan d'interface ne doit pas modifier le comportement mécanique global de l'éprouvette qui se comporte alors comme un assemblage en parallèle de deux éléments de même résistance.

7.4 SYNTHESE ET CONCLUSIONS

Ce chapitre était consacré à l'étude de l'adhérence des réparations et à sa durabilité dans le temps sous l'action d'un chargement hygrothermique réel. Les variables de l'étude étaient la nature du matériau de réparation et l'épaisseur de la réparation. Les principaux résultats obtenus sont les suivants:

- Après 28 jours d'hydratation et de séchage, la nature du matériau de réparation et l'épaisseur de réparation n'ont pas d'influence sur l'adhérence des réparations.
- Après 2 ans d'exposition aux conditions climatiques réelles, l'adhérence des réparations n'a pas subi d'altération significative, quelle que soit la nature du matériau et l'épaisseur de recouvrement:
  - Même lorsque l'épaisseur de la réparation est du même ordre que la profondeur seuil de séchage, aucune baisse d'adhérence n'a été enregistrée.
  - La nature du matériau de réparation n'a pas d'influence sur la durabilité de l'adhérence. En effet, même dans le cas des mortiers pour lesquels le retrait est très important, aucune baisse d'adhérence n'a été enregistrée.

Ces différents résultats montrent que le séchage seul, en conditions hygrothermiques réelles ne conduit pas à une diminution de l'adhérence initialement développée. D'une part, le séchage lorsqu'il atteint l'interface n'est pas dommageable, en conditions hygrométriques réelles, pour les forces physico-chimiques à l'origine de l'adhésion entre la réparation et le support. D'autre part, la fissuration due au retrait empêché n'engendre pas localement de diminution de l'adhérence.

CHAPITRE 8

FISSURATION DES REPARATIONS

Ce chapitre présente les résultats concernant le suivi de la fissuration due au retrait empêché sur les réparations minces exposées aux conditions hygrothermiques réelles. Tel qu'expliqué dans le Chapitre 4, l'étude de la fissuration des réparations à été réalisée par le biais de deux études complémentaires. La première étude à consisté à quantifier, suivant plusieurs paramètres, la fissuration visible en surface des réparations. La seconde étude est une analyse de la fissuration interne au sein des réparations. L'objectif spécifique de cette seconde étude était d'analyser les mécanismes de fissuration due au retrait empêché, notamment dans la zone correspondant à l'interface avec le support.

8.1 FISSURATION DE SURFACE

La fissuration de surface a été quantifiée par le biais de deux paramètres de base, soit l'espacement et l'ouverture des fissures. Pour chacun de ces paramètres, il est possible à partir des relevés de fissures réalisés à différentes échéances de calculer une valeur moyenne et une valeur maximale ainsi qu'un histogramme qui en représente la répartition. Le couplage de ces deux paramètres a aussi permis de déterminer un indice de fissuration qui correspond à une densité linéique de fissuration (la méthode de calcul de cet indice est donnée dans le Chapitre 4). L'ensemble des valeurs de ces différents paramètres de fissuration sont présentées de façon complète dans l'annexe 3-"Paramètres de fissuration de surface des réparations". Au sujet des résultats présentés dans ce chapitre, il est à noter que lorsqu'aucune fissure n'était visible ou que les fissures n'étaient pas assez développées pour être mesurées avec les moyens techniques utilisés, les valeurs des paramètres de fissuration ont été fixés à zéro.

8.1.1 Apparition de la fissuration

Des fissures de retrait empêché sont apparues en surface des réparations de 25 mm, 50 mm et de 75 mm en mortier ordinaire 10 jours après leur mise en place. Cette fissuration rapide a permis l'enregistrement des premières mesures des paramètres de fissuration dès l'échéance de 14 jours dans le cas du mortier ordinaire. Pour les autres matériaux, les premières fissures sont apparues plus tard. Dans le cas du béton ordinaire, les premières mesures de fissures ont été possible à l'échéance de 28 jours. Dans le cas du béton hautes performances, des fissures mesurables avec les moyens d'observation préconisés se sont développées seulement après 90 jours environ. Enfin, dans le cas du mortier fibré, aucune fissure n'a été observée en surface des réparations au cours de la première année d'exposition in situ.

8.1.2 Influence de l'épaisseur de la réparation

Un des objectifs principaux de l'étude était de vérifier l'influence de l'épaisseur de la réparation sur son comportement mécanique en situation de retrait restreint. Dans ce paragraphe sont présentés des résultats concernant l'influence de l'épaisseur de réparation sur les paramètres de fissuration tels que l'ouverture moyenne de fissure et l'espacement moyen entre fissures.

Comme le montrent les figures 8.1 et 8.2, pour les matériaux non renforcés de fibres d'acier, plus l'épaisseur de la réparation est importante, plus l'ouverture moyenne des fissures est importante et plus l'espacement moyen entre fissures augmente. Ce comportement s'explique par le fait que plus l'épaisseur de la réparation augmente, plus la restriction apporté par le support aux déformations de retrait diminue. De façon concomitante, à échéance fixe, une augmentation de l'épaisseur se traduit également par une diminution du degré de séchage dans la couche de réparation (cf. résultats présentés au Chapitre 6). Les réparations en mortier fibré ont affiché un comportement différent. En effet, une augmentation de l'épaisseur de réparation entraîne bien une augmentation de l'ouverture moyenne de fissure (Figure 8.1), mais l'espacement moyen entre fissures reste

stable (Figure 8.2). Ce comportement traduit la capacité du mortier fibré à contrôler la fissuration.

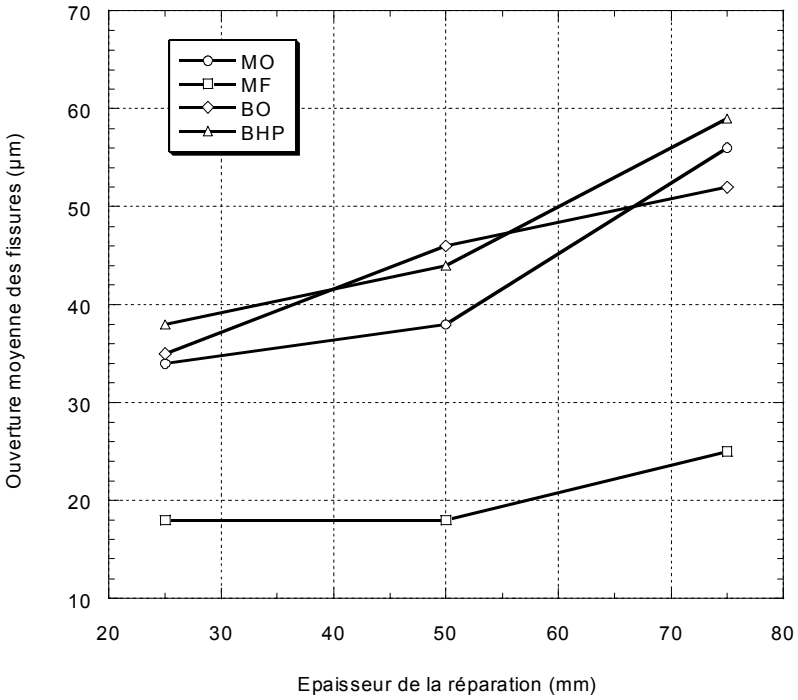


Figure 8.1: Ouverture moyenne des fissures en fonction de l'épaisseur de la réparation (après 1 an)

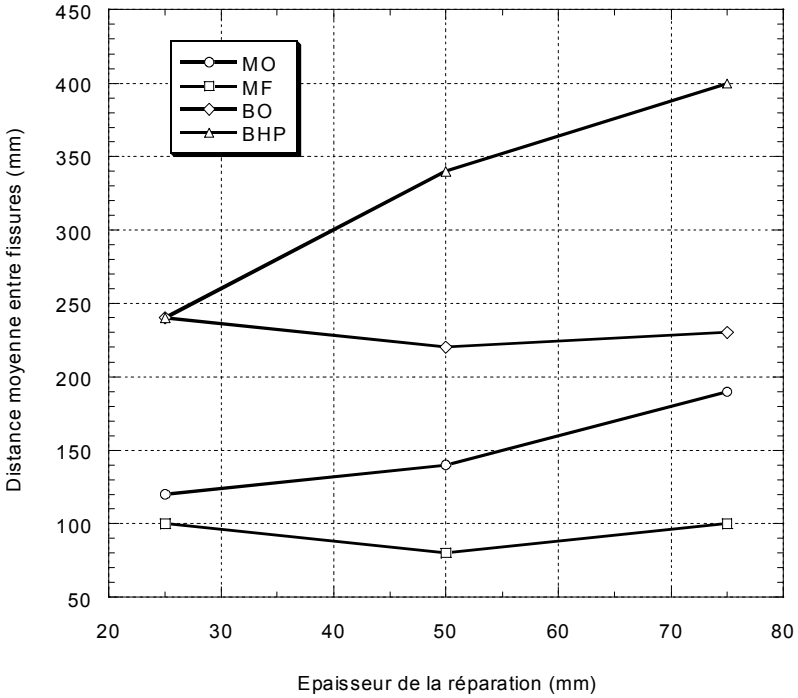


Figure 8.2: Distance moyenne entre fissures en fonction de l'épaisseur de la réparation (après 1 an)

Afin de mieux cerner l'effet de l'épaisseur de la réparation sur la fissuration de surface, il est également intéressant de réaliser un histogramme des ouvertures de fissure suivant l'épaisseur. La figure 8.3 présente les histogrammes des ouvertures de fissure dans le cas du mortier ordinaire à l'échéance de 1 an en fonction de l'épaisseur de la réparation. Ce type d'analyse montre que pour l'épaisseur de 25 mm la majorité des fissures ont une ouverture faible et qu'il y a absence de fissure avec une ouverture importante. Lorsque l'épaisseur augmente, en particulier dans le cas de l'épaisseur de 75 mm, il y a apparition de fissures d'ouverture plus importante. Le nombre de fissures de faible ouverture étant stable, cela signifie que le nombre totale de fissure augmente. Ainsi, une augmentation de l'épaisseur de réparation doit conduire à une augmentation de la densité de fissuration.

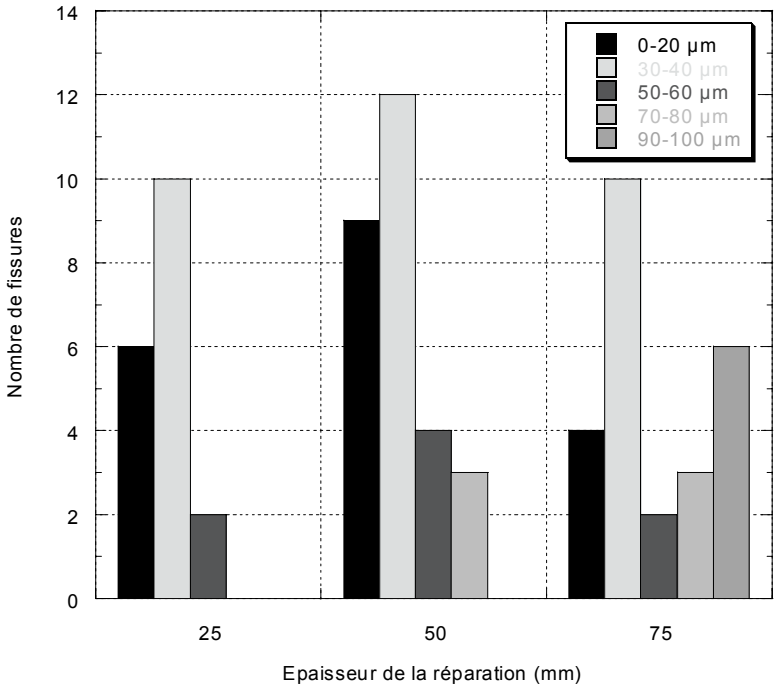


Figure 8.3: Histogramme des ouvertures de fissure en fonction de l'épaisseur pour les réparations en mortier ordinaire à l'échéance de 1 an

Cette influence de l'épaisseur de la réparation sur la fissuration de surface est également démontrée par les indices de fissuration et par les relevés de fissures. Il faut cependant étudier ces relevés de fissures avec précaution, car ils ne

permettent pas de distinguer les fissures selon leur ouverture, celles-ci étant toutes tracées avec la même grosseur de trait. Leur observation n'est donc pas suffisante pour qualifier la densité de fissuration (cf. Chapitre 4).

La figure 8.4 montre que globalement, une augmentation de l'épaisseur de réparation entraîne une augmentation de l'indice de fissuration. Une fois encore, les réparations en mortier fibré ont affiché un comportement différent puisque leur indice de fissuration reste quasiment stable quelle que soit l'épaisseur. Cela démontre à nouveau la capacité du mortier fibré à contrôler la fissuration. La figure 8.5 présente, pour le cas des réparations en mortier ordinaire à l'échéance de 1 an, les relevés de fissuration selon l'épaisseur. L'augmentation de l'épaisseur se traduit par des fissures moins nombreuses et plus espacées. Les fissures étant en contrepartie plus ouvertes (ce que l'on ne peut observé seulement à partir des relevés), la surface totale fissurée augmente et donc incidemment la densité de fissuration augmente également (d'où un indice de fissuration plus important).

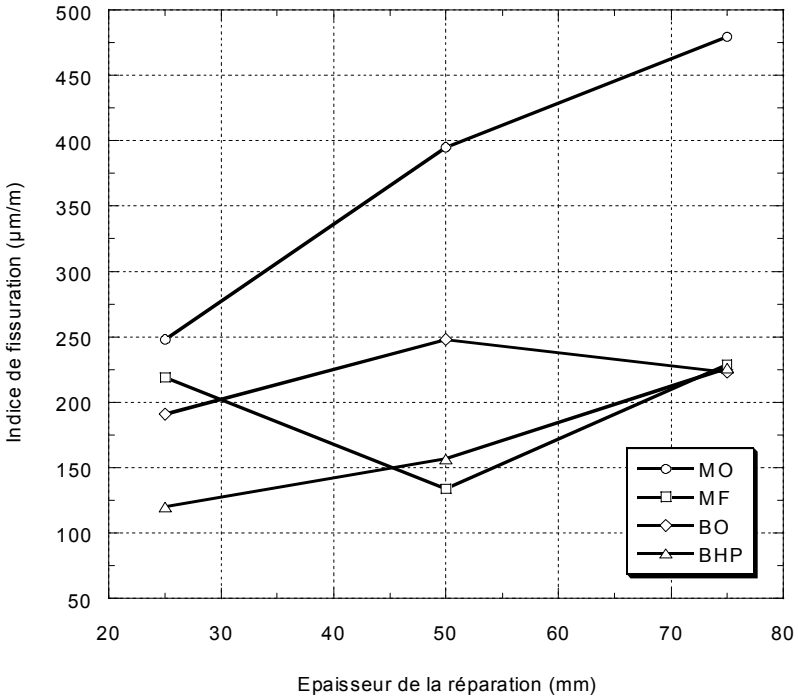
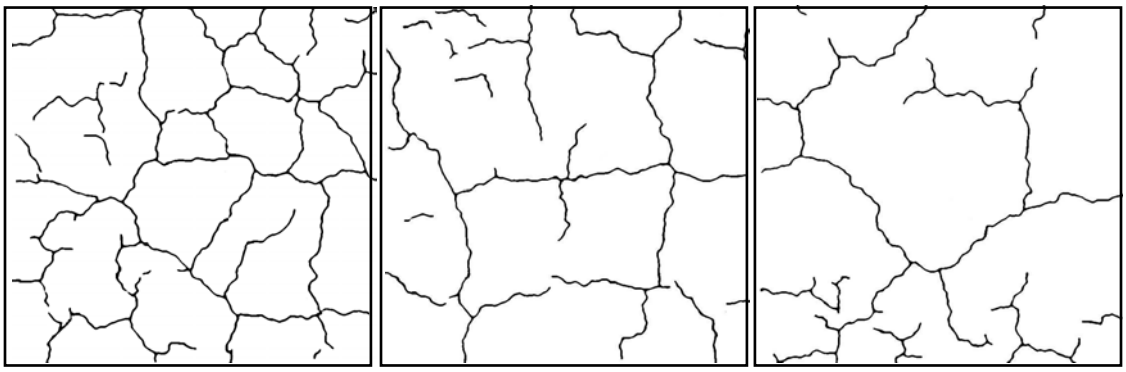


Figure 8.4: Indice de fissuration à l'échéance de 1 an en fonction de l'épaisseur de la réparation



(a):MO25 (b):MO50 (c):MO75

Figure 8.5: Relevé de fissure à 1 an en fonction de l'épaisseur dans le cas des réparations en mortier ordinaire (dimensions réelles 40x40 cm)

8.1.3 Influence de la nature du matériau de réparation

Comme le montrent les résultats des essais de retrait présentés aux Chapitre 5, les déformations des quatre matériaux de réparation sont sensiblement différentes, notamment lorsque l'on compare celles des mortiers et celles des bétons. Il est donc intéressant d'étudier la répercussion de ces comportements volumétriques différents au séchage sur la fissuration de surface des réparations in situ. Le paragraphe suivant décrit ainsi la fissuration des réparations de 50 mm à l'échéance de 1 an selon la nature du matériau avec lequel elles ont été réalisées.

La figure 8.6 présente les valeurs d'ouverture moyenne et maximale des fissures ainsi que l'espacement moyen entre fissures à l'échéance de 1 an dans le cas des réparations de 50 mm pour les différents matériaux. À cette échéance pour laquelle le réseau de fissure de surface est bien développé, les ouvertures moyennes et maximales de fissure sont globalement peu différentes, hormis pour le mortier fibré dont les ouvertures sont en comparaison particulièrement faibles. En revanche, les espacements entre fissures sont très différents d'un matériau à l'autre. Si le cas particulier du mortier fibré est écarté, les mesures d'espacement reflètent bien les différentes sensibilités au retrait des matériaux. Le mortier ordinaire développe un espacement moyen entre fissures nettement plus faible que ceux du béton ordinaire et du béton hautes performances. Ce résultat montre

que le réseau de fissures du mortier ordinaire est plus dense que ceux des 2 bétons, même si les ouvertures moyennes des fissures sont peu différentes. Cette différence de comportement en fissuration indique clairement qu'à une échéance donnée, le retrait développé in situ par le mortier ordinaire est plus important et donc que les contraintes de retrait empêché qui induisent la fissuration observée sont plus importantes. La comparaison de l'espacement moyen entre fissures des deux bétons confirme également la sensibilité au séchage plus faible du béton hautes performances puisque sa valeur d'espacement moyen est 50 % plus grande que celle du béton ordinaire. Le réseau de fissures de surface du béton hautes performances est donc moins dense que celui du béton ordinaire, même si en terme d'ouverture, leurs comportements sont similaires.

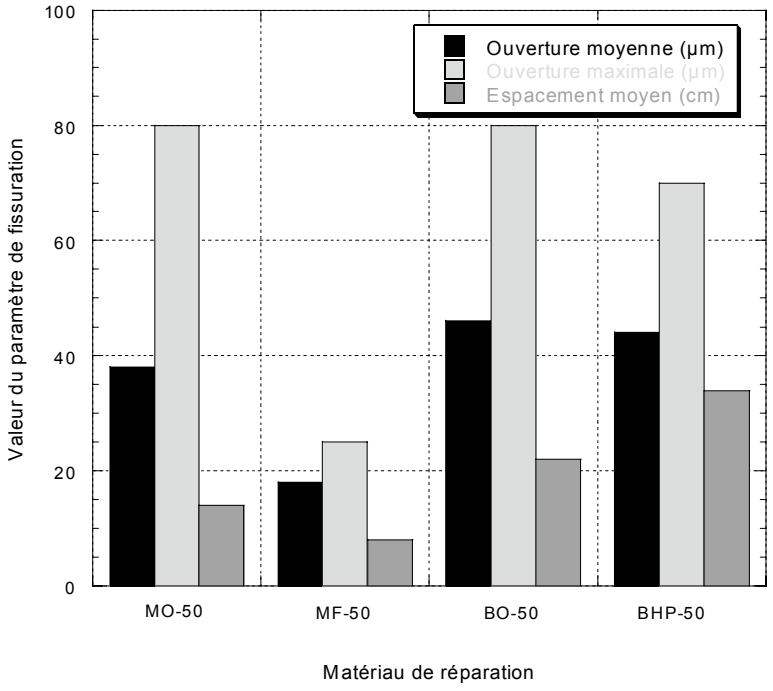


Figure 8.6: Ouverture maximale, ouverture moyenne et espacement moyen entre fissures à l'échéance de 1 an pour les réparations 50 mm

Ce début d'analyse montre que pour bien estimer l'état de fissuration de surface des réparations, la valeur de l'ouverture moyenne des fissures ne suffit pas. Il est en effet nécessaire d'établir une corrélation avec un autre paramètre tel que l'espacement moyen entre fissures de façon à pouvoir rendre compte de la densité

de la fissuration. C'est dans ce but que l'indice de fissuration a été déterminé pour chacune des réparations (cf. 4.3.1.4 Chapitre 4). Rappelons que cet indice de fissuration représente la densité de fissuration linéique de la surface considérée, c'est à dire une longueur fissurée rapportée à une longueur totale. La figure 8.7 présente les valeurs d'indice de fissuration suivant la nature du matériau à l'échéance de 1 an pour les réparations de 50 mm.

Les valeurs des indices de fissuration reflètent bien les différents comportements dégagés précédemment. L'indice de fissuration des réparations en mortier ordinaire est en effet nettement plus important que ceux des réparations en béton ordinaire et en béton hautes performances. Ce résultat confirme la densité de fissuration plus importante de la réparation en mortier ordinaire à l'échéance de 1 an. De la même façon, la comparaison de l'indice de fissuration des deux bétons montre que la densité de fissuration de surface du béton hautes performances est plus faible que celle du béton ordinaire. Enfin, le comportement très différent du mortier fibré est de nouveau observé. Sa valeur d'indice de fissuration est en effet significativement plus faible que celle du mortier ordinaire. Ces deux matériaux étant constitués d'une matrice cimentaire identique et suivant les mêmes proportions volumiques, ce résultat montre une fois de plus l'efficacité des fibres pour contrôler la fissuration de retrait restreint.

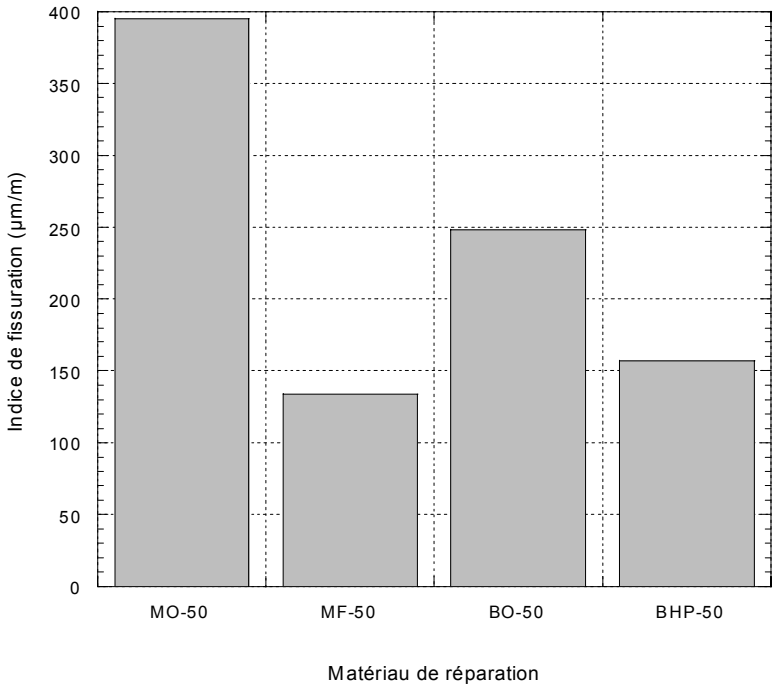


Figure 8.7: Indice de fissuration des réparations de 50 mm à l'échéance de 1 an

Afin de compléter les résultats sur les indices de fissuration il est intéressant d'étudier les relevés de fissures correspondants. La figure 8.8 présente les relevés effectués à l'échéance de 1 an sur les différentes réparations de 50 mm. Les relevés de fissuration sont sensiblement différents selon la nature du matériau de réparation. Le mortier ordinaire a développé une densité de fissuration beaucoup plus importante que celles du béton ordinaire et du béton à hautes performances. Le réseau de fissures du mortier ordinaire est du type "damier" et est celui dont la densité est la plus importante. En revanche, les réseaux de fissures des deux bétons sont peu ramifiés et ne présentent que quelques fissures principales.

Les relevés de fissures illustrent également bien le comportement très différent du mortier fibré comparativement au mortier ordinaire[1]. Le réseau de fissures du mortier fibré présente une fissuration également importante, mais n'affiche pas la forme caractéristique en "damier". Le réseau de fissures du mortier fibré est en effet beaucoup plus discontinu que celui du mortier ordinaire. Les fissures sont

[1] Rappelons cependant que les relevés de fissures ne permettent aucune distinction entre les différentes ouvertures de fissure, celles-ci étant tracées avec la même grosseur de trait

très nombreuses, conduisant ainsi à un indice de fissuration relativement élevé (notamment par rapport à celui des deux bétons), mais leurs ouvertures sont nettement plus faibles. Ce comportement démontre à nouveau la capacité du mortier fibré à contrôler la fissuration en la rendant plus diffuse sous la forme d'une multitude de petites fissures mieux réparties.

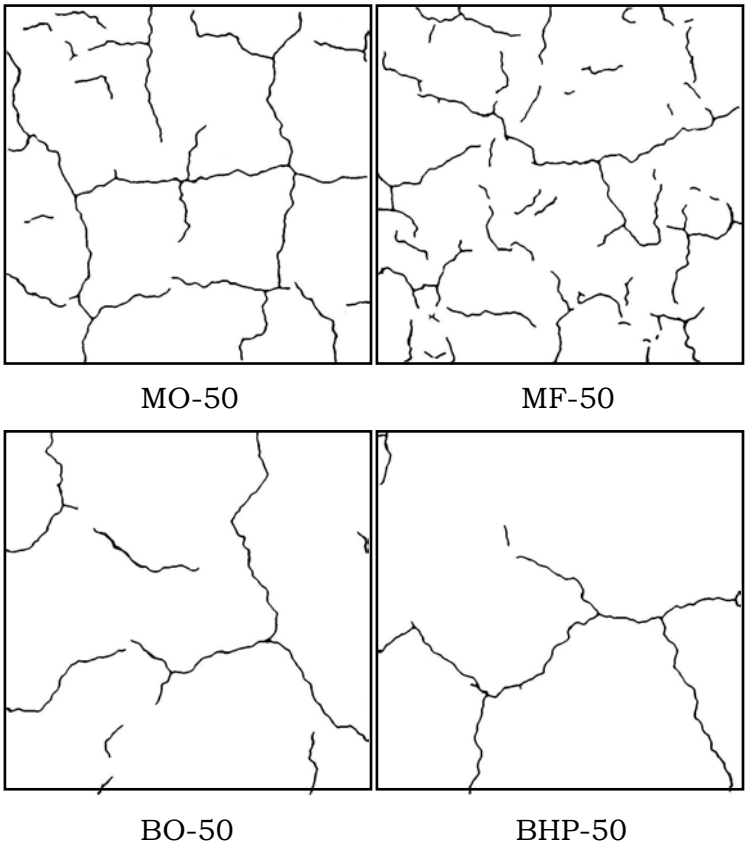


Figure 8.8: Relevés de fissures pour les réparations de 50 mm à l'échéance de 1 an

L'influence de la nature du matériau de réparation sur la fissuration de surface peut aussi s'observer à partir de la distribution des fissures exprimée en terme d'ouverture. Les histogrammes de distribution des ouvertures de fissure sont présentés sur la figure 8.9 pour l'ensemble des réparations de 50 mm d'épaisseur à l'échéance de 1 an.

Les résultats montrent que la distribution des fissures est très différente selon la nature du matériau de réparation. Le mortier ordinaire présente un nombre de

fissures important avec une majorité de petites (0-20 µm) et moyenne (30-40 µm) fissures. En proportion du nombre total de fissures, le mortier ordinaire présente peu de fissures d'ouverture importante, c'est-à-dire dont l'ouverture est supérieure à 50 µm. Le mortier fibré présente également un nombre de fissures important mais la quasi-totalité des ouvertures se situent dans la gamme des petites fissures (0-20 µm). Pour ce matériau, il y a absence totale de fissure d'ouverture supérieure à 40 µm. Ces résultats dénotent la capacité du mortier fibré à diffuser la fissuration sous la forme de nombreuses fissures faiblement ouvertes. Le béton ordinaire et le béton à hautes performances présentent des histogrammes de distribution de fissures similaires. Le nombre de fissures est d'une part nettement plus faible que celui des deux mortiers et d'autre part, la distribution en ouverture est beaucoup plus répartie. Les deux bétons présentent en effet une gamme d'ouvertures de fissure beaucoup plus large. La comparaison des distributions de fissures des deux bétons ne fait pas ressortir un comportement très différent, si ce n'est un nombre de fissures plus petit pour le béton hautes performances.

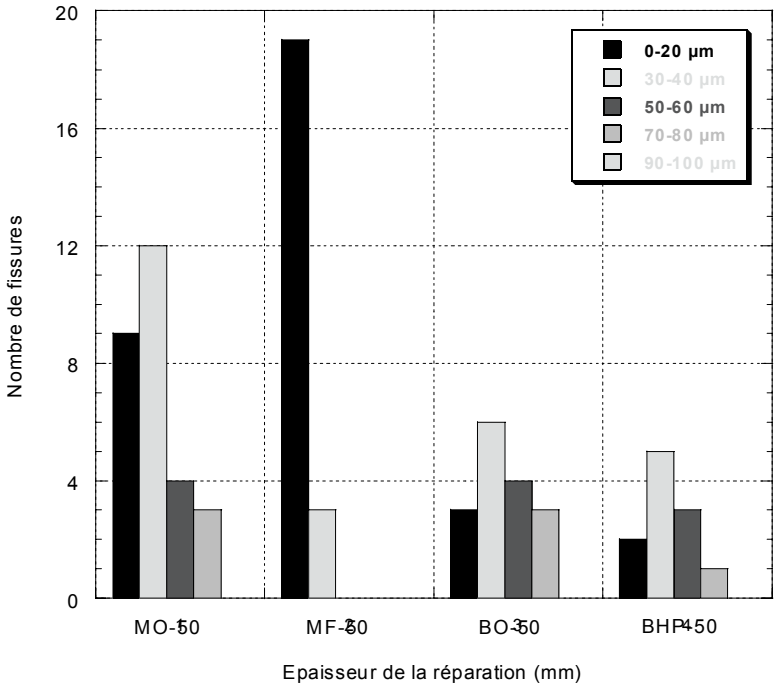


Figure 8.9: Histogramme des ouvertures de fissure à l'échéance de 1 an pour les réparations de 50 mm

8.1.4 Cinétique et processus de fissuration

Après avoir étudié l'influence de paramètres tels que l'épaisseur et la nature du matériau sur la réponse en fissuration de surface des réparations, il est important d'étudier la cinétique de cette fissuration afin de pouvoir juger de son impact sur la durabilité du système réparation/support. Les résultats présentés dans ce paragraphe vont donc s'attacher à décrire l'évolution de la fissuration de surface à travers l'évolution dans le temps des paramètres de fissuration.

En premier lieu, il convient d'étudier l'évolution des ouvertures moyennes et maximales des fissures, tel que présenté sur les figures 8.10 et 8.11. Les résultats montrent que, sauf pour le mortier fibré, l'ouverture moyenne des fissures augmente rapidement au cours des 3 premiers mois. Il est intéressant de noter que cette période est également celle au cours de laquelle le retrait in situ évolue rapidement (cf. Chapitre 6). Au delà de cette période, les ouvertures moyennes continuent à évoluer, mais à un taux beaucoup plus faible. Le comportement du mortier fibré est très différent. En effet, au cours des 3 premiers mois, aucune fissure n'est apparue en surface de la réparation en mortier fibré. L'ouverture des fissures apparues après 1 an évolue par la suite selon un taux similaire à celui des autres matériaux. Ce résultat démontre la capacité des fibres à contrôler la fissuration non seulement en limitant son importance en terme d'ouverture mais aussi en retardant significativement son développement. Il serait toutefois intéressant de suivre à plus long terme l'évolution des ouvertures de fissure du mortier fibré compte tenu des résultats des figures 8.10 et 8.11.

Globalement, comme le montre la figure 8.11, l'évolution des ouvertures maximales de fissure est similaire à celle des ouvertures moyennes. L'ensemble de ces résultats indique qu'avec le temps et la progression du séchage, le retrait continue à se développer au sein des réparations, conduisant ainsi à l'augmentation des ouvertures de fissure. Il serait donc intéressant de continuer à suivre l'évolution de la fissuration de surface sur les 12 poutres de 4 m restantes à l'issue de l'étude.

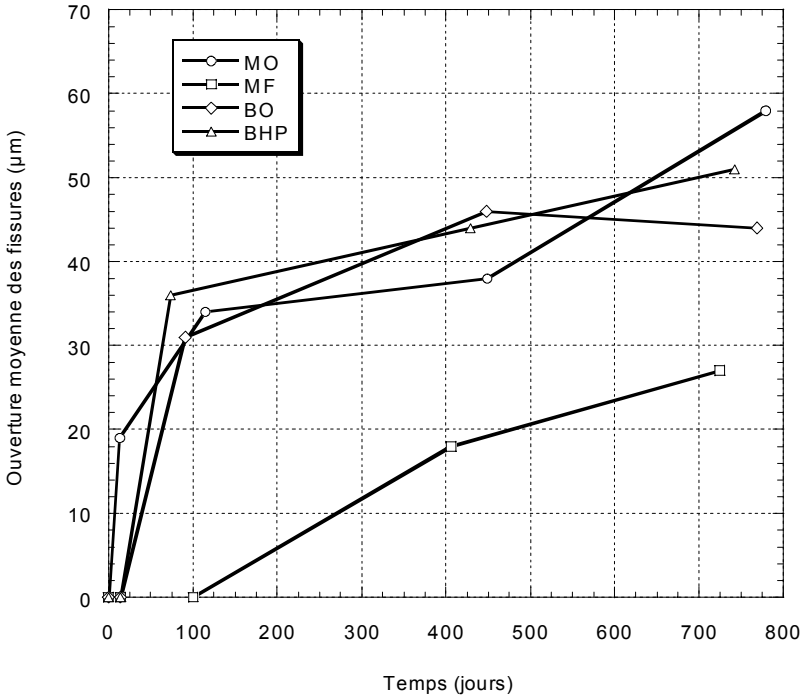


Figure 8.10: Ouverture moyenne des fissures en fonction du temps pour les réparations de 50 mm

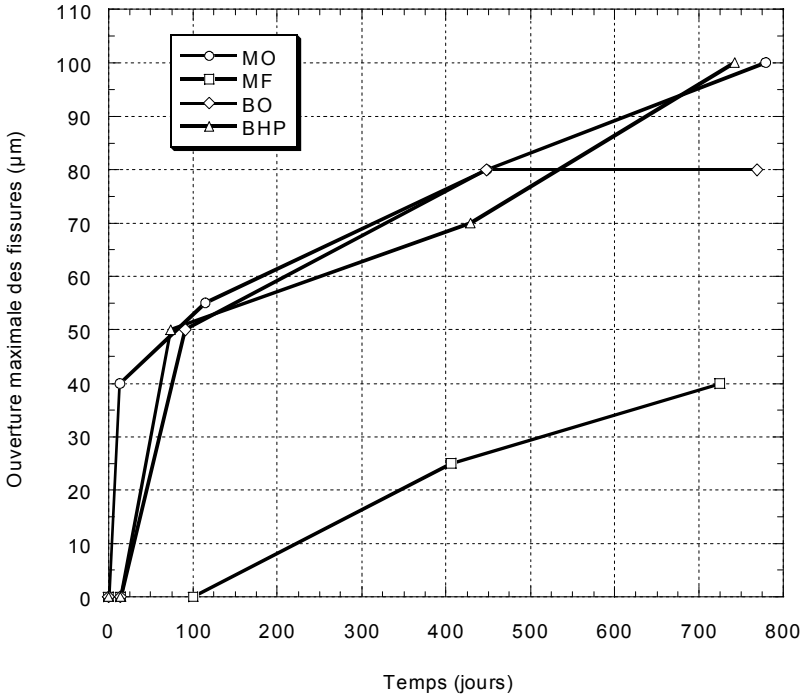


Figure 8.11: Ouverture maximale des fissures en fonction du temps pour les réparations de 50 mm

La figure 8.12 présente l'évolution de l'espacement moyen entre fissures pour les réparations de 50 mm. Avec le temps et donc avec l'avancement du retrait, l'espacement moyen entre fissures diminue significativement. Ce résultat indique que le nombre de fissures a augmenté de façon importante. Dans le cas du mortier ordinaire, l'espacement entre fissures reste stable entre les échéances de 1 an et 2 ans. Les espacements entre fissures du béton ordinaire et du béton hautes performances ont continué à diminuer entre 1 an et 2 ans, mais de façon moins importante. Pour le mortier ordinaire, la stabilisation de l'espacement moyen entre fissures à partir de 2 ans indique le début de la stabilisation du processus de développement de la fissuration.

L'espacement moyen entre fissures de la réparation en mortier fibré est relativement stable entre l'échéance de 1 an et celle de 2 ans. Ce résultat est à prendre avec précaution compte tenu de la nature très discontinue du réseau de fissures de ce matériau et de la difficulté à déterminer l'espacement entre fissures sur les faces latérales des réparations, comme cela a été fait pour les autres matériaux.

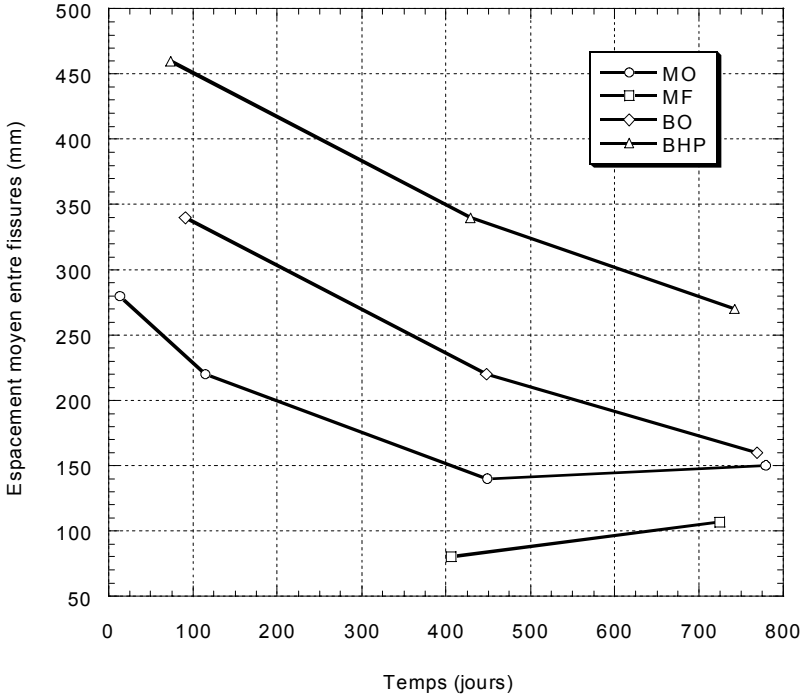


Figure 8.12: Espacement moyen entre fissures en fonction du temps pour les réparations de 50 mm

La densité de fissuration de surface d'une réparation peut être définie par le couplage entre l'ouverture des fissures, leur nombre et leur longueur. Puisque pour l'ensemble des réparations, les ouvertures moyennes et maximales de fissure ont augmenté et que l'espacement moyen entre fissures à diminué, cela indique que la densité de fissuration de surface des réparations a augmenté de façon importante au cours des 2 années.

Ce résultat est confirmé par l'évolution des indices de fissuration au cours du temps, présentée sur la figure 8.13, et par l'évolution des relevés de fissures suivant les échéances de mesure, présentés sur la figure 8.14 pour le cas de la réparation en mortier ordinaire de 50 mm.

De façon générale, les indices de fissuration ont constamment augmenté au cours des deux années de suivi de la fissuration. Des différences de comportement sont cependant apparues. Au cours des 3 premiers mois, l'indice de fissuration du mortier ordinaire a augmenté beaucoup plus rapidement que ceux des autres matériaux et ne semble pas stabilisé après 2 ans. Il est également intéressant de remarquer les valeurs similaires des indices de fissuration après 2 ans développées par le béton ordinaire, le béton hautes performances et le mortier fibré, malgré des natures de réseau de fissures très différentes.

Afin de compléter l'analyse de l'évolution des indices de fissuration, l'étude des relevés de fissures suivant l'échéance de mesure fournie des informations supplémentaires. Les relevés de fissures de la réparation en mortier ordinaire de 50 mm (Figure 8.14) montrent qu'à l'échéance de 114 jours, le nombre de fissures est encore peu important et que l'espacement entre fissures est élevé. À cette échéance, l'indice de fissuration est encore faible et, par conséquent, la densité de fissuration est peu importante. À 3 mois, les fissures sont orientées préférentiellement dans la direction perpendiculaire à la longueur de la poutre. Entre 3 mois et 1 an, le réseau de fissures s'est beaucoup développé et prend la forme d'un réseau de type "damier", avec des fissures orientées dans les deux directions principales. Les relevés de la figure 8.14 montrent que très peu de nouvelles fissures sont apparues entre 1 an et 2 ans. Or, puisque l'indice de

fissuration correspondant a augmenté, cela signifie que le développement de la fissuration s'est traduit dans ce cas essentiellement par une augmentation de l'ouverture des fissures.

Comme le montrent l'ensemble des relevés présentés dans l'annexe 3 – "Relevés de fissuration de surface des réparations", un comportement similaire est observé dans le cas des réparations en béton ordinaire et en béton hautes performances. En revanche, les réparations en mortier fibré présentent un comportement différent. En effet, les relevés de fissures des réparations en mortier fibré montrent que de nouvelles fissures sont apparues en nombre important entre 1 an et 2 ans. Ce comportement particulier signifie que, dans le cas du mortier fibré, l'augmentation de l'indice de fissuration entre 1 an et 2 ans se traduit par l'apparition de nouvelles fissures plutôt que par l'augmentation de l'ouverture des fissures déjà existantes. Ce résultat met à nouveau en évidence la capacité des fibres à contrôler et à diffuser la fissuration.

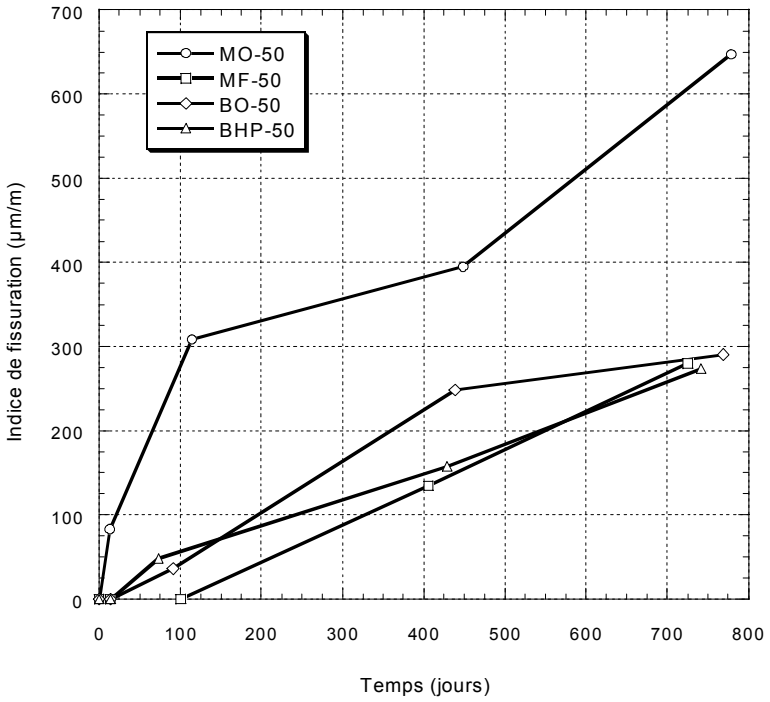


Figure 8.13: Évolution en fonction du temps de l'indice de fissuration des réparations de 50 mm

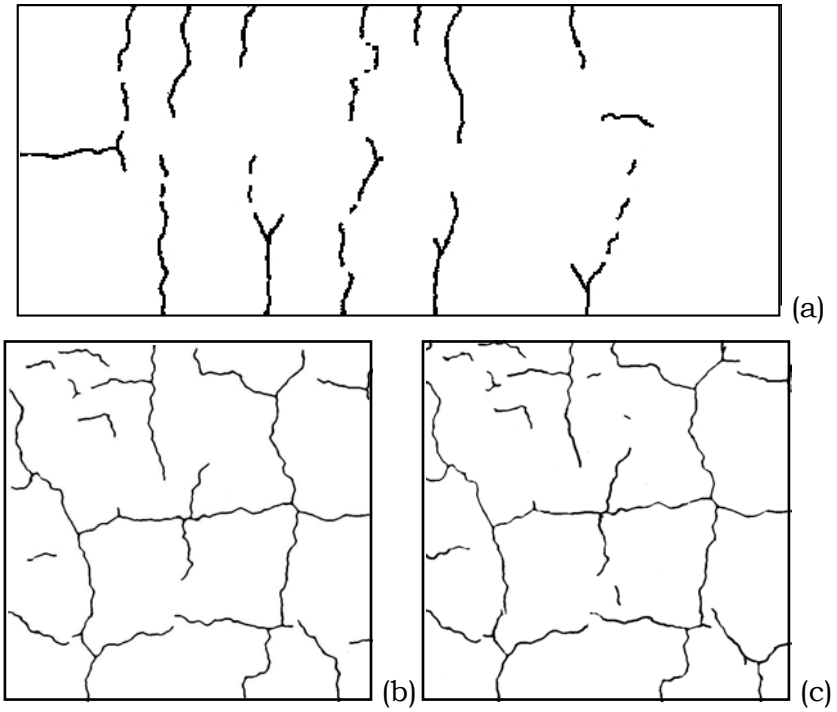


Figure 8.14: Relevés de fissure de la réparation en mortier ordinaire de 50 mm aux échéances de 114 jours (a), 1 an (b) et 2 ans (c) (le relevé (a) correspond à la totalité de la surface de la réparation)

Afin de mieux interpréter le processus de fissuration des réparations, il est intéressant d'étudier l'évolution au cours du temps des histogrammes de distribution des fissures. La figure 8.15 présente le cas type de la réparation en mortier ordinaire de 50 mm.

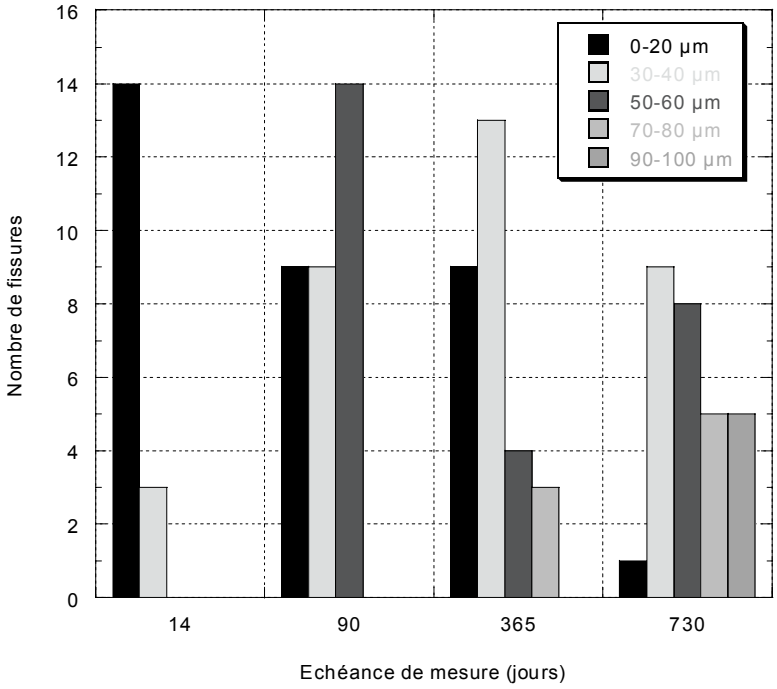


Figure 8.15: Distribution des ouvertures de fissure de la réparation en mortier ordinaire de 50 mm en fonction du temps

Au début, à l'échéance de 14 jours, les fissures sont peu nombreuses et peu ouvertes. À cette échéance de mesure, la majorité des ouvertures de fissure se situe en effet dans la gamme 0-20 µm. Par la suite, avec le temps, le nombre de fissures augmente de façon importante et les ouvertures de fissure couvrent une gamme plus large. À 90 jours, les fissures de la gamme d'ouverture 50-60 µm sont majoritaires. L'apparition de fissures d'ouverture plus importante se fait au détriment des fissures de faible ouverture dont le nombre diminue de façon significative. Après 2 ans, les fissures de faible ouverture (0-20 µm) sont minoritaires et des fissures d'ouverture plus importante (80-100 µm) se sont développées et occupent une proportion importante.

Ces distributions d'ouvertures de fissures au cours du temps montrent que dans le cas du mortier ordinaire, la fissuration se développe essentiellement par une augmentation de l'ouverture des fissures initiales apparues au cours des 100 premiers jours et non par l'apparition de nouvelles fissures. Ces observations s'appliquent également au cas du béton ordinaire et du béton hautes performances, mais ne s'appliquent pas au cas du mortier fibré, dont le comportement est différent comme il l'a été discuté précédemment.

8.1.5 Remarques concernant l'aspect visuel de la fissuration de surface

L'aspect de la fissuration développée en surface d'une réparation suite au chargement hygrométrique est une considération parfois très importante dans un travail de réhabilitation d'ouvrage, qu'il s'agisse d'un ouvrage d'art ou d'un bâtiment. Or il n'y a pas d'équation entre la perception des usagers et l'intensité effective de la fissuration (ouverture des fissures, densité, profondeur, …).

En parallèle aux mesures d'ouvertures de fissure, d'espacement entre fissures et de calcul de densité linéique de la fissuration, cette section aborde de façon simplifiée la perception de la fissuration de surface qui a pu être réalisée sur les réparations in situ au cours des deux années du projet. En dehors du paramètre épaisseur de recouvrement, qui influe fortement sur les ouvertures de fissure et l'espacement entre fissure (cf. 8.1.2) et donc sur l'aspect visuel de la fissuration, la perception de la fissuration de surface pour les différents matériaux peut se résumer de la façon suivante :

- Mortier Ordinaire : Les fissures sont nettement visibles, en particuliers les fissures principales qui sont les plus ouvertes et qui, dans la majorité des cas, sont traversantes dans la largeur de la surface de réparation. Les mailles principales du réseau de fissures sont également bien visibles sans appareil de grossissement optique. Le mortier ordinaire est le matériau ayant développé, à épaisseur et à échéance données, la fissuration dont l'aspect visuel est le plus mauvais.

- Mortier Fibré : La fissuration développée par ce matériau est invisible sans un examen approfondi de la surface de réparation à l'aide d'un appareil de grossissement optique. Il s'agit toutefois d'un matériau dont la densité de fissuration linéique est importante. La diffusion de la fissuration par les fibres sous la forme de nombreuses petites fissures très peu ouvertes et formant un réseau discontinu a donc largement contribuée au développement d'un aspect visuel de bonne qualité comparativement à celui du mortier ordinaire, matériau dont l'intensité du retrait est du même ordre de grandeur.

- Béton Ordinaire : Pour ce matériau, la fissuration est nettement moins importante que celle du mortier ordinaire. Les ouvertures de fissure sont en moyenne plus faibles et les fissures sont moins nombreuses. Cependant, la fissuration étant très peu diffuse, les ouvertures restent relativement importantes conduisant à des fissures bien visibles. L'aspect visuel de la fissuration de ce matériau est meilleur que celui du mortier, mais demeure somme toute assez mauvais.

- Béton Hautes Performances : Il s'agit du matériau ayant développé la fissuration la moins importante et cela quel que soit le paramètre considéré. Malgré cela, les fissures apparues restent très localisée et comme pour le béton ordinaire les ouvertures sont relativement importantes. De plus, les fissures apparaissent avec un contraste très fort par rapport à la couleur gris sombre du matériau de réparation. Les fissures sont ainsi très visibles, ce qui conduit à un aspect visuel beaucoup plus mauvais que pour le béton ordinaire, malgré une fissuration moins importante à tous les égards.

8.1.6 Synthèse de l'étude de la fissuration de surface

L'étude de la fissuration de surface a permis de mettre en évidence différents aspects importants du comportement in situ des réparations :

- L'épaisseur de la réparation a une influence importante sur sa réponse en fissuration. Globalement, plus l'épaisseur est importante, plus les fissures

sont espacées et donc moins nombreuses, mais en revanche plus leur ouverture est importante. Il correspond également à ces observations une augmentation de l'indice de fissuration avec l'augmentation de l'épaisseur de la réparation. En d'autres termes, cela signifie qu'à une échéance donnée, plus l'épaisseur de la réparation est importante et plus la densité de fissuration de surface est élevée.

- La nature du matériau de réparation a une influence importante sur la réponse en fissuration du système. Alors que les ouvertures moyennes et maximales de fissure sont peu sensibles à la nature du matériau de réparation, l'espacement moyen entre fissures y est fortement corrélé. Les matériau à retrait important tel que le mortier ordinaire développent, à échéance donnée, un nombre de fissures nettement plus important que les matériaux à retrait plus faible tels que le béton ordinaire et le bétons hautes performances. Le gain apporté par l'utilisation d'un béton hautes performances est cependant relativement faible puisque le réseau de fissures et l'indice de fissuration correspondants ne sont que peu différents de ceux du béton ordinaire. Enfin, l'utilisation de fibres d'acier a permis de contrôler la fissuration d'un matériau dont le retrait est important. En effet, le mortier fibré a affiché à tout point de vue un comportement très différent des autres matériaux. Non seulement les ouvertures de fissures y sont nettement plus faibles, mais le réseau de fissures présente également un caractère très discontinu comparativement à celui du mortier ordinaire. Ces résultats sont le signe d'un contrôle de la fissuration, avec comme résultat un réseau de fissures moins ouvertes et plus diffuses.

- L'étude de la cinétique de fissuration montre que la fissuration se développe suivant un processus en 2 phases. Au cours de la première phase, qui correspond globalement au 3 premiers mois, apparaissent des fissures initiales faiblement ouvertes (20-60 µm) et dont l'espacement est important (200 à 450 mm selon le matériau). Par la suite, sauf dans le cas du mortier fibré, peu de nouvelles fissures apparaissent, surtout entre 1 an et 2 ans. En fait, le processus de développement de la fissuration durant cette seconde

phase correspond essentiellement à l'augmentation de l'ouverture des fissures principales, ce qui implique une augmentation de la densité de fissuration de surface des réparations. Entre les échéances de 1 an et 2 ans, le processus de fissuration commence à se stabiliser. Le développement du retrait dans le couche de réparation favorise le développement croissant de fissures d'ouverture importante (80-100 µm) au détriment des fissures de faible ouverture (0-20 µm). Il serait néanmoins intéressant de continuer à suivre l'évolution de la fissuration de surface sur les 12 poutres de 4 m restantes à l'issue de l'étude. Le processus de fissuration de surface des réparations en mortier fibré est très différent. Avec le temps, la densité de fissuration du mortier fibré augmente comme celle des autres matériaux, mais cela ne se traduit pas de la même façon. En effet, les ouvertures de fissure augmentent peu et en contrepartie, le nombre de fissures croit beaucoup. Contrairement au réseau de fissures en "damier" du mortier ordinaire, le réseau du mortier fibré est très discontinu avec des fissures dont les ouvertures sont en totalité incluses dans la gamme des faibles ouvertures (0-40 µm). Ce processus par diffusion de la fissuration de retrait empêché montre clairement la capacité des fibres d'acier à contrôler la fissuration.

8.2 FISSURATION INTERNE

Un des principaux objectifs de l'étude sur la fissuration des réparations était d'analyser les mécanismes de propagation des fissures de retrait au sein de la couche de recouvrement et en particulier le mode de propagation des fissures dans la zone d'interface avec le support. Comme cela est expliqué en détail dans le Chapitre 4, la méthode d'investigation retenue pour l'étude de la fissuration interne est la *technique des répliques*. Étant donné le nombre limité de répliques pouvant être analysées, il a fallu restreindre le nombre de conditions différentes étudiées. L'étude paramétrique réalisée comprend tout d'abord une étude complète de l'effet de l'épaisseur pour un matériau, en l'occurrence le mortier ordinaire. Ensuite, l'influence de la nature du matériau de réparation a été étudiée pour les 4 matériaux, pour la seule épaisseur de 50 mm. Ces 2 études sur l'effet de l'épaisseur et de la nature du matériau de réparation ont été menées sur des plaques extraites des réparations à l'échéance de 1 an (cf. Chapitre 4,

section 4.3.1.4, pour la description des prélèvements et des caractéristiques des plaques). Afin de compléter les résultats, quelques répliques ont également été réalisées sur des prélèvements effectués aux échéances de 28 jours et de 2 ans sur les réparations en mortier ordinaire.

8.2.1 Remarques préliminaires sur la nature de la fissuration

Les plaques à partir desquelles sont effectuées les répliques ont une largeur de 100 mm. Une analyse préliminaire systématique au microscope optique a permis d'identifier les fissures présentes sur chaque plaque. Compte tenu de la densité de la fissuration développée par les réparations en mortier ordinaire, le nombre de fissures par plaque varie, pour ce matériau, de 1 à 3. Les réparations en béton ordinaire et en béton hautes performances ayant un espacement entre fissures plus important, les plaques correspondantes ne comportent qu'une seule fissure principale. Aucune fissure secondaire, moins ouverte et moins profonde que la fissure principale, n'a été observé sur les plaques. Ce constat a pu être confirmé lors des observations sur répliques à une échelle d'observation beaucoup plus petite.

8.2.2 Morphologie des fissures

Les fissures observées sur les répliques sont localisées et continues quelle que soit l'épaisseur de la réparation et quelle que soit la nature du matériau de réparation. Quelques microfissures ont parfois été observées notamment au niveau des gros granulats.

D'une façon générale, les fissures observées sur les répliques présentent une morphologie qui peut être divisée en 2 modes suivant la profondeur atteinte. En surface, la fissure est nettement plus ouverte (ouvertures de l'ordre de 10 à 20

µm*) qu'en profondeur et a souvent un aspect très abîmé au niveau des lèvres. Ce premier mode morphologique est observable sur les 20 premiers millimètres environ depuis la surface de la réparation. Par la suite, la fissure se referme très nettement et son ouverture ne dépasse pas quelques microns. Dans ce second mode, la fissure reste bien continue jusqu'à une profondeur importante malgré la présence d'obstacles tels que les granulats ou les bulles d'air. Dans les zones plus profondes, près de l'interface avec le support, la fissure affiche une nature différente. Elle présente en effet souvent quelques sauts ou décalages, notamment aux bords des granulats, ce qui la rend difficile à observer. Les 2 modes morphologiques des fissures sont schématisés sur la figure 8.16 et sont illustrés sur les figures 8.17 à 8.19, dont les photos sont toutes issues de réparations en mortier ordinaire à l'échéance de 1 an.

Les changements de morphologie des fissures suivant la profondeur de la fissure sont vraisemblablement dus au gradients d'humidité qui engendrent des gradients de déformation et de contrainte. Le premier mode morphologique rencontré en surface peut être corrélé avec les cycles de mouillage-séchage dont la profondeur d'action est du même ordre. Le comportement dans la zone d'interface sera analysé ultérieurement.

---

* Les ouvertures de fissures mesurée lors de l'observation des répliques ne doivent servir qu'à établir des comparaisons car elles n'ont pas de sens en dehors du contexte de chargement des réparations

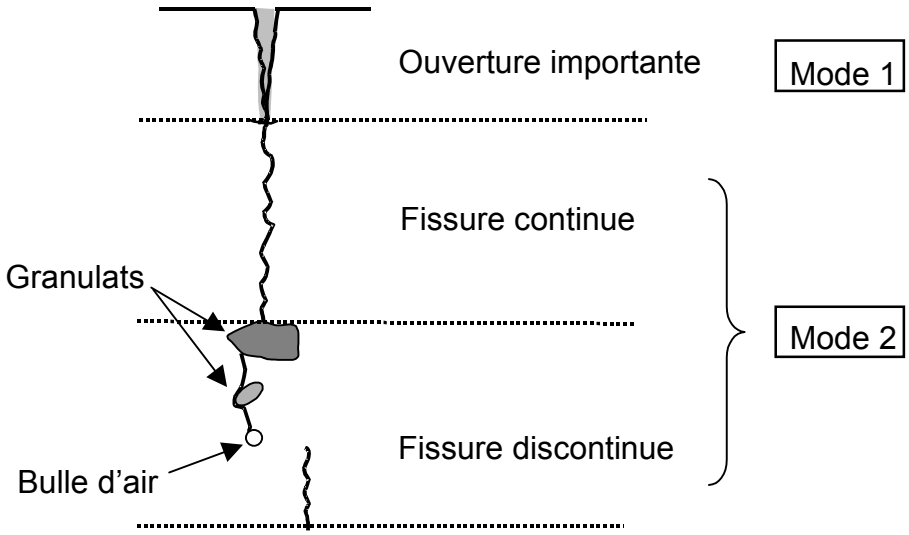


Figure 8.16: Schéma représentant les 2 modes morphologiques des fissures

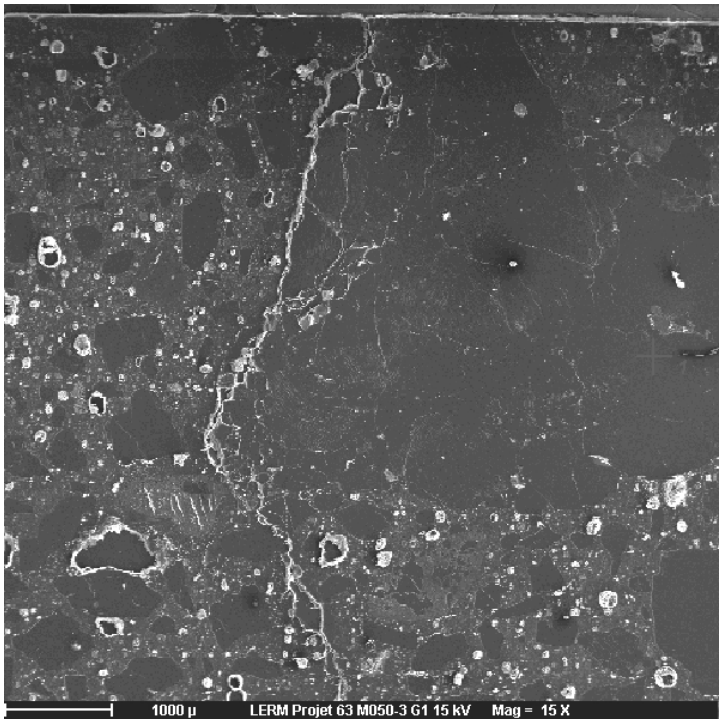


Figure 8.17: Morphologie de surface des fissures (mode 1)

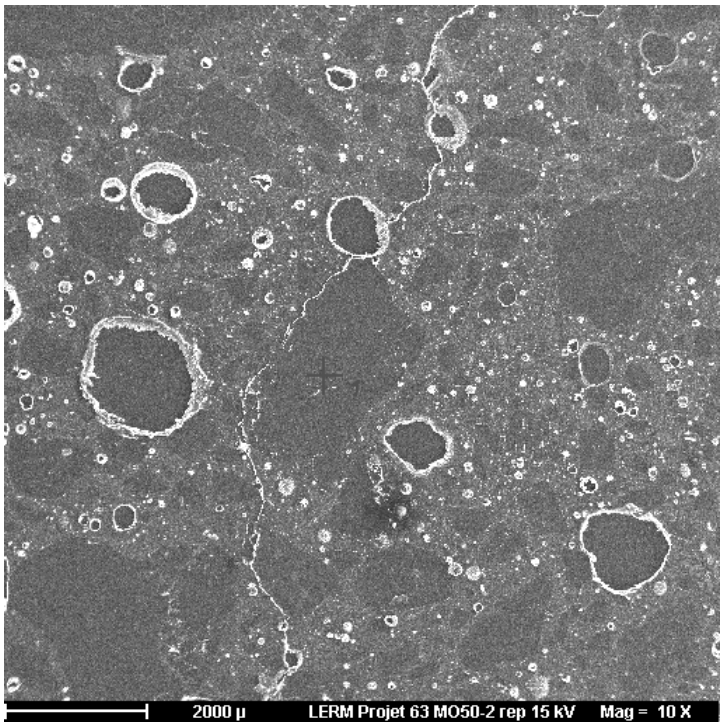


Figure 8.18: Morphologie typique de la fissure en profondeur avec fissure continue malgré la présence d'obstacles (mode 2) Image issue de la réplique provenant de MO50 à l'échéance de 1 an

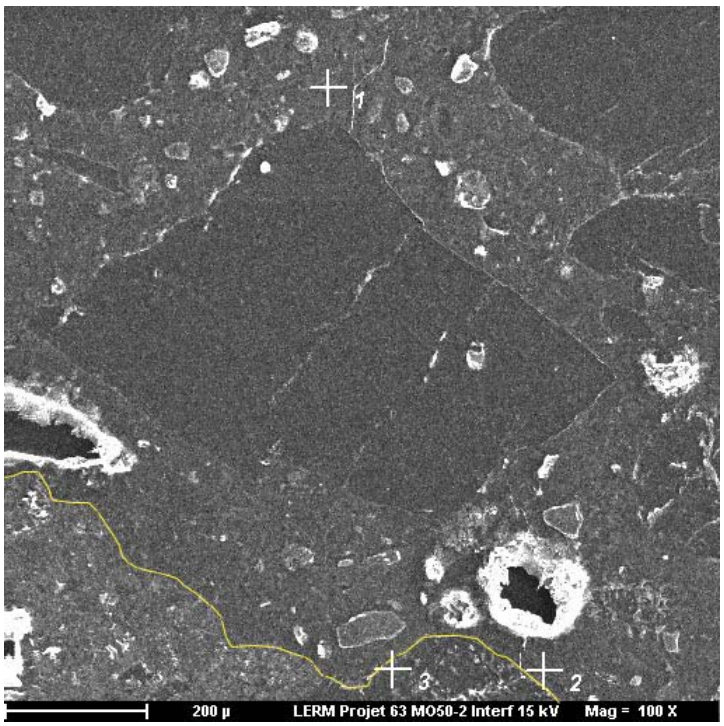


Figure 8.19: Morphologie en zone proche de l'interface (mode 2) avec saut au voisinage d'un granulat (1,2 :fissure, 3 : granulat du support, ligne jaune: interface) Image issue de la réplique provenant de MO25 à l'échéance de 1 an

8.2.3 Profondeur de propagation des fissures dans la réparation

L'interface avec le support est une zone qui comporte un nombre important de bulles d'air et de gros granulats préfissurés appartenant au support, dégagés par la technique de préparation de surface employée. Cela rend difficile le suivi des fissures, car celles-ci viennent souvent "mourir" dans ces zones de propagation privilégiées. Malgré cela, l'analyse des répliques issues des réparations en mortier ordinaire montre qu'à l'échéance de 1 an, les fissures se propagent loin en profondeur dans la couche de recouvrement et atteignent l'interface dans quasiment tous les cas. Cette profondeur de propagation a été observée pour les 3 épaisseurs de réparation. Les figures 8.20 et 8.21 montrent quelques exemples de fissures atteignant l'interface.

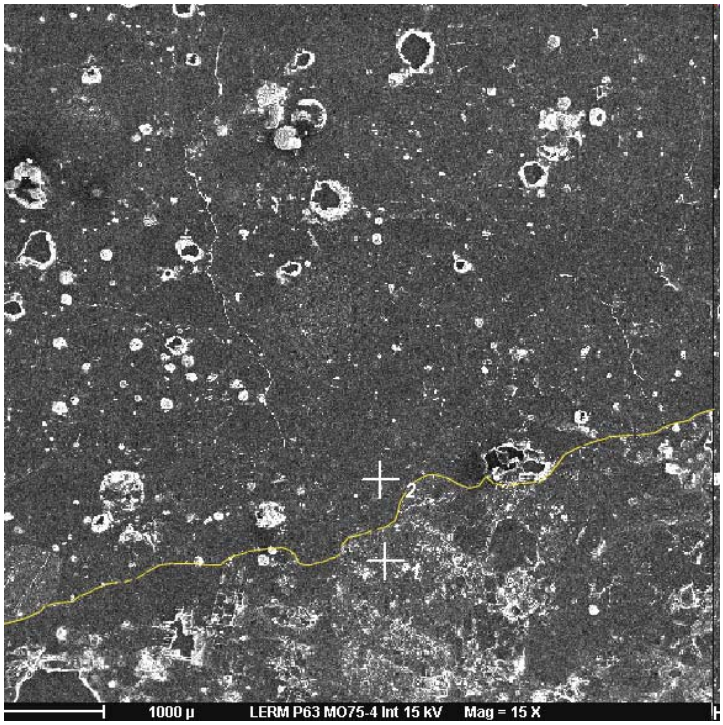


Figure 8.20: Fissure atteignant l'interface – image issue de la réplique provenant de MO75 à l'échéance de 1 an (1: support, 2: réparation, ligne jaune: interface)

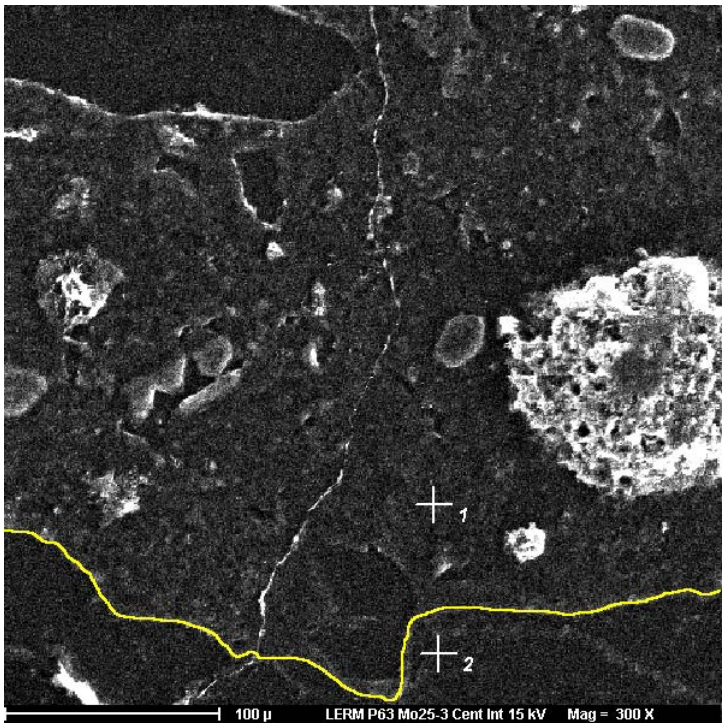


Figure 8.21: Fissure atteignant l'interface – image issue de la réplique provenant de MO25 à l'échéance de 1 an (1: réparation, 2: support, ligne jaune: interface)

Afin de confirmer les résultats sur la profondeur de propagation des fissures à l'échéance de 1 an, des répliques provenant des réparations de 50 mm en béton ordinaire et en béton hautes performances ont été analysées. Les observations réalisées montrent à nouveau que les fissures se propagent jusqu'à l'interface. Un exemple est donné à la figure 8.22.

La réplique provenant de la plaque issue de la réparation en mortier fibré de 50 mm montre un parcours de fissuration différent. En effet, une fissure principale est observée dans la zone proche de la surface de la réparation, mais celle-ci ne se propage pas jusqu'à l'interface avec le support. À environ 30 mm de la surface, la fissure devient difficile à observer, car elle présente plusieurs sauts et ramifications et devient extrêmement fine (ouverture inférieure au micron).

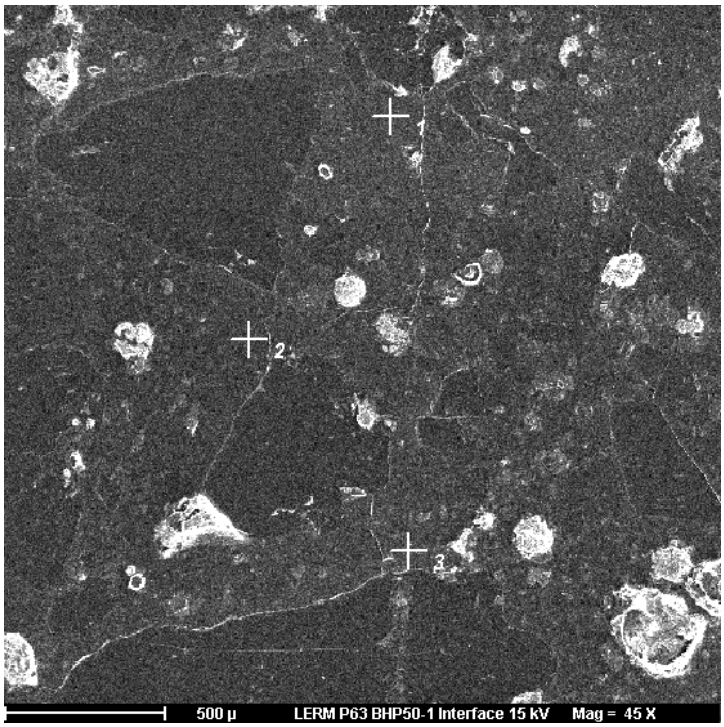


Figure 8.22: Fissure atteignant l'interface – réplique provenant de BHP50 à l'échéance de 1 an (1,2,3: ramification de la fissure avec granulat appartenant au support sous croix n°3)

8.2.4 Mécanisme de propagation des fissures à l'interface

Tel que montré au paragraphe précédent, les fissures principales observées en surface des réparations se propagent rapidement en profondeur dans la couche de réparation et atteignent, après 1 an, l'interface avec le support. Un des objectifs principaux de l'étude de la fissuration des réparations était de déterminer le mode de propagation à l'interface. La question est en effet de savoir si une fissure qui atteint l'interface va se propager dans le support ou provoquer le décollement de la réparation par propagation le long de l'interface.

Les observations réalisées sur l'ensemble des répliques issues des réparations âgées de 1 an montrent que l'épaisseur de la réparation est un paramètre important. En effet, pour les réparations d'épaisseur 50 mm et 75 mm, les fissures ne se propagent pas davantage lorsqu'elles atteignent l'interface. Pour ces deux épaisseurs, aucune propagation de fissure n'a été observé dans le support ou le long de la ligne d'interface. En revanche, le comportement des

réparations d'épaisseur 25 mm est très différent. En effet, de façon systématique, sur les répliques issues des réparations de 25 mm en mortier ordinaire, en béton ordinaire et en béton hautes performances, les fissures qui atteignent l'interface se propagent dans le support. Il n'a été observé aucune propagation de fissure le long de l'interface et aucune fissure orientée dans la direction parallèle à l'interface. Des exemples de propagation de fissure dans le support, issus des différentes réparations de 25 mm, sont présentés sur les figures 8.23 à 8.25. Dans le cas de la réparation en mortier ordinaire, la fissure s'est propagée dans le support sur seulement quelques millimètres. Par contre, dans le cas des réparations en béton ordinaire et en béton hautes performances, la profondeur de pénétration dans le support est de 20 mm environ.

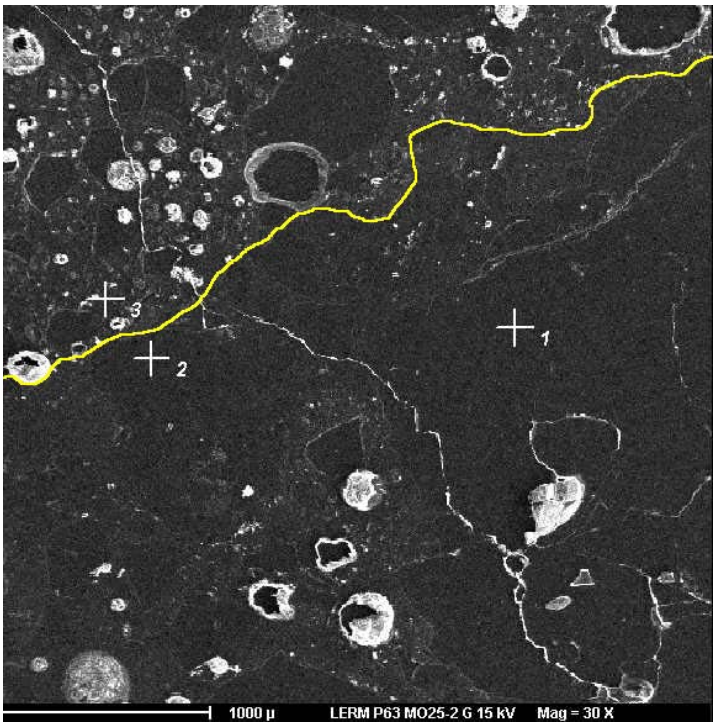


Figure 8.23: Propagation de fissure dans le support – image issue de la réplique provenant de MO25 à l'échéance de 1 an (1: granulat du support, 2: support, 3: réparation, ligne jaune: interface)

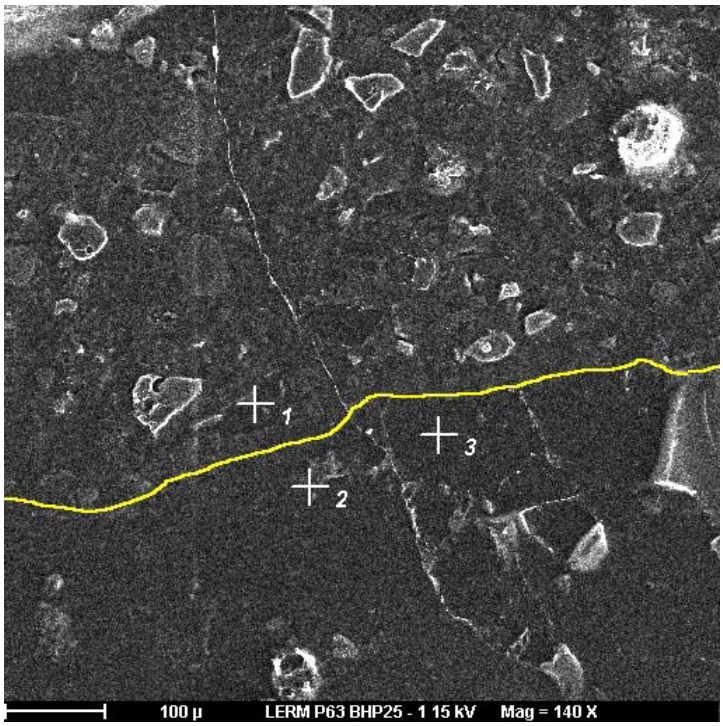


Figure 8.24: Propagation de fissure dans le support – image issue de la réplique provenant de BHP25 à l'échéance de 1 an (1: réparation, 2: support, 3: granulat du support, ligne jaune: interface)

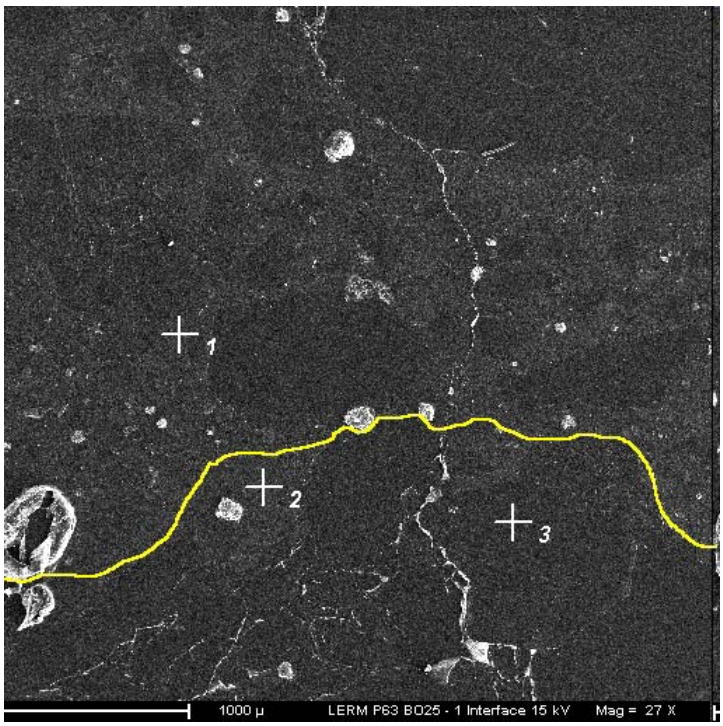


Figure 8.25: Propagation de fissure dans le support – image issue de la réplique provenant de BO25 à l'échéance de 1 an (1: réparation, 2: support, 3: granulat du support, ligne jaune: interface)

8.2.5 <u>État de fissuration à 28 jours</u>

Compte tenu des résultats obtenus à l'échéance de 1 an pour des répliques issues des 12 combinaisons de réparations (3 épaisseurs et 4 matériaux), une analyse plus restreinte a été menée pour l'échéance de 28 jours. Il a été choisi d'observer des répliques issues de plaques extraites des réparations en mortier ordinaire de 25 mm et de 50 mm.

Les résultats montrent qu'à l'échéance de 28 jours, les fissures sont localisées et continues et développent la même morphologie qu'à l'échéance de 1 an (Figure 8.26). Les fissures se rendent déjà jusqu'à l'interface à l'échéance de 28 jours pour les deux épaisseurs analysées. Cependant, ce qui diffère par rapport aux observations faites pour l'échéance de 1 an, les fissures s'arrête lorsqu'elles atteignent l'interface et ne se propagent pas dans le support pour l'épaisseur de 25 mm.

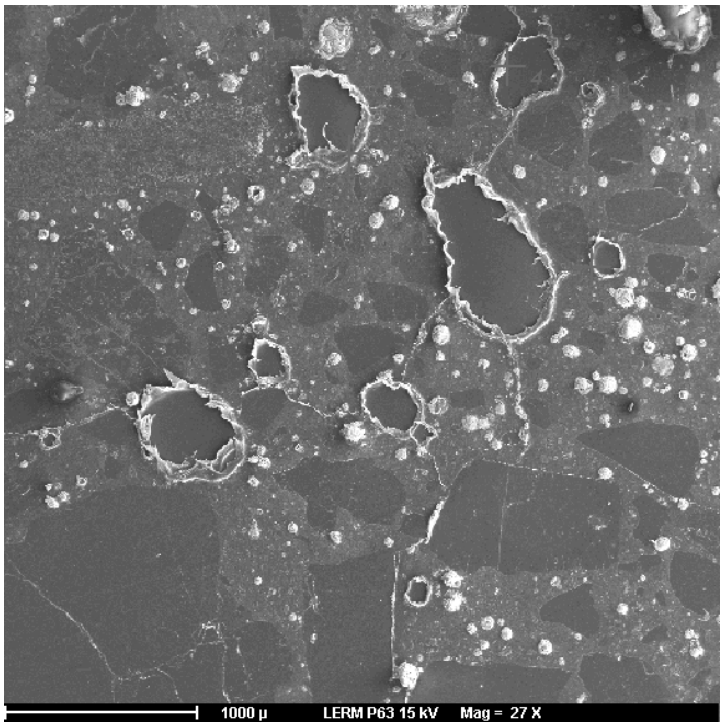


Figure 8.26: Morphologie proche de l'interface avec ramifications après passage dans une bulle (image issue d'une réplique provenant de MO25 à 28 jours)

8.2.6 État de fissuration à 2 ans

Afin d'étudier l'évolution de la fissuration interne, des répliques ont été réalisées à partir de plaques prélevées des réparations en mortier ordinaire pour chacune des 3 épaisseurs après 2 ans. L'analyse de ces répliques montrent tout d'abord que la fissuration est toujours de nature localisée et continue, et que les fissures affichent toujours une morphologie en 2 modes suivant la profondeur atteinte. L'analyse des répliques montre également que les fissures observées sont profondes mais n'atteignent pas de façon systématique l'interface. Des exemples de fissure se propageant en profondeur mais stoppée à quelques millimètres de l'interface sont présentés sur les figures 8.27 et 8.28. Aucune fissure se propageant dans le support ou le long de l'interface n'a été relevée.

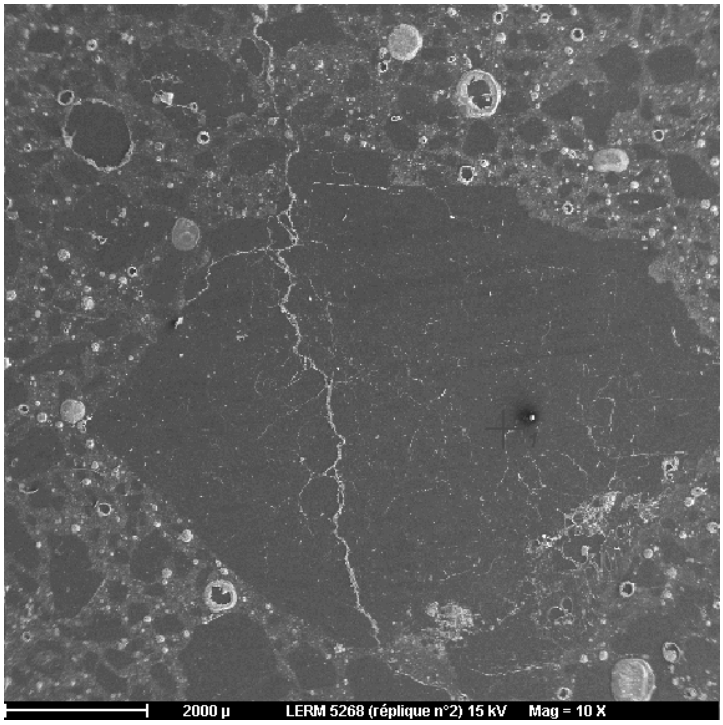
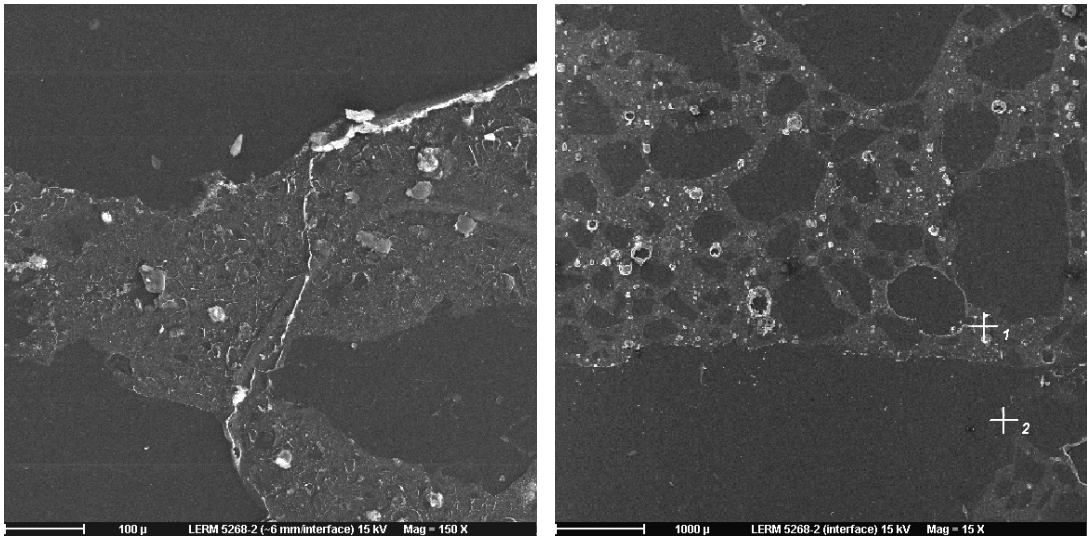


Figure 8.27: Fissure atteignant une zone profonde mais stoppée à quelques millimètres de l'interface par un granulat endommagé (image issue d'une réplique provenant de MO25 à l'échéance de 2 ans)



(a) (b)

Figure 8.28: Fissure se propageant jusqu'à environ 6 mm de l'interface mais ne l'atteignant pas (a): détail de la fissure dans la zone proche de l'interface ; (b): détail dans le prolongement de la fissure au niveau de l'interface (1 : réparation, 2 : granulat du support) (image issue d'une réplique provenant de MO50 à l'échéance de 2 ans)

8.2.7 Synthèse de l'étude de la fissuration interne

L'étude de la fissuration interne avait pour but la compréhension des mécanismes de fissuration au sein de la couche de réparation et visait en particulier l'observation des mécanismes de propagation des fissures à l'interface avec le support. Les différentes analyses réalisées sur répliques ont permis de mettre en évidence les points suivants :

- La fissuration interne des réparations est formée de fissures localisées et continues. Dans les conditions expérimentales mises en œuvre, les déformations de retrait empêchées n'ont donc pas conduit à une fissuration interne diffuse, même dans la partie supérieure des réparations où le séchage est le plus important.

- La morphologie des fissures évolue avec la profondeur de pénétration dans la couche de réparation. En surface, les fissures sont plus ouvertes et affichent, sur une profondeur d'environ 20 mm, des bords endommagés. Cet aspect

pourrait être attribué à l'action des cycles de mouillage-séchage qui agissent en surface des réparations. Plus en profondeur, les fissures deviennent extrêmement fines avec des ouvertures n'excédant pas quelques microns. Enfin, dans la zone proche de l'interface, il est souvent observé des sauts ou décalages, notamment lors du passage de la fissure dans un granulat, ainsi que des ramifications. Cette morphologie variable en fonction de la profondeur et surtout l'aspect des fissures en partie supérieure confirme le rôle prépondérant du retrait de dessiccation dans les mécanismes à l'origine de la fissuration, même si l'action du retrait endogène n'est vraisemblablement pas négligeable, notamment au jeune âge.

- L'analyse des répliques montre que dès 28 jours, la fissuration est déjà profonde. Les fissures n'atteignent cependant pas de façon systématique l'interface, en particulier pour les épaisseurs les plus importantes. À cette échéance, le degré de séchage de la réparation n'étant pas encore très important, cela montre que les gradients de déformation engendrés par le séchage différentiel sont suffisamment forts pour conduire à une propagation des fissures plus rapide que le l'avancement du front de séchage.

- À l'échéance de 1 an, les fissures principales observées sur les répliques se propagent dans la quasi-totalité des cas jusqu'à l'interface avec le support et cela, pour les 3 épaisseurs de réparation étudiées. De plus, de façon systématique, dans le cas des réparations de 25 mm, les fissures traversent l'interface et se propagent dans le support. La profondeur de pénétration des fissures dans le support n'est cependant pas très importante et varie entre quelques millimètres et quelques centimètres. En outre, hormis la présence dans le support de quelques fissures horizontales (notamment au niveau de l'interface pâte/granulat) attribuables à la préparation de surface, il n'a été observé aucune fissure orientée de façon à initier le décollement ou la délamination de la réparation. La propagation des fissures dans le support pour les réparations de 25 mm d'épaisseur a été observée pour les réparations en mortier ordinaire, en béton ordinaire et en béton hautes performances.

- Globalement, entre 1 an et 2 ans, la fissuration interne a peu changé et se trouve dans une phase de stabilisation ou de lente évolution. La profondeur de propagation des fissures n'a pas évolué de façon significative. En effet, pour les épaisseurs de réparation de 50 mm et 75 mm, les fissures atteignaient déjà l'interface à 1 an et ne se sont pas propagées dans le support ou le long de l'interface par la suite. Dans le cas particulier des réparations de 25 mm, l'importance du phénomène de propagation dans le support n'a pas évolué.

L'ensemble de ces résultats montrent que sous l'action d'un chargement hygrométrique, le comportement mécanique du système réparation/support est monolithique. En effet, les fissures qui atteignent l'interface sont freinées ou se propagent dans le support. En aucun cas les fissures ne se propagent de façon à provoquer la délamination ou le décollement de la réparation.

La propagation des fissures dans le support confirme également le rôle prépondérant du séchage comme phénomène à l'origine de la fissuration des réparations. Les déformations empêchées de retrait endogène dans la réparation ne peuvent en effet provoquer la fissuration du support.

La propagation des fissures dans le support, seulement observée pour les réparations de 25 mm, est à corréler à l'existence d'une épaisseur seuil de séchage engendrée par l'action des cycles de mouillage-séchage et dont la valeur est de l'ordre de 10 mm à 30 mm selon la nature du matériau, pour la période de suivi considéré.

8.2.8 Discussion sur la fissuration interne

Plusieurs phénomènes et mécanismes sont susceptibles d'intervenir dans le processus de fissuration et de propagation des fissures dans le support. Les paragraphes qui suivent proposent une analyse et une synthèse de ces phénomènes pour préparer l'étude théorique présentée dans les chapitres 9,10 et 11.

Si au moment des réparations, après 1 an de vieillissement in situ, la partie supérieure support est considérée en équilibre hydrique avec le milieu ambiant, une re-saturation est nécessaire afin que le séchage puisse progresser dans le support et conduire au développement de contraintes de traction et par la suite à sa fissuration. Cette re-saturation du support peut provenir du rééquilibrage des teneurs en eau entre les 2 matériaux en contact par "pompage" par le support, de l'action des cycles de mouillage-séchage ou encore du mouillage préalable de la surface du support réalisé avant la mise en place des réparations. Pour les réparations de 25 mm, l'action des deux phénomènes, pompage et cycles de mouillage-séchage, est possible. Toutefois, pour les réparations de 50 mm et de 75 mm, seul le pompage peut agir pour re-saturer le support puisque la profondeur d'action des cycles de mouillage-séchage n'est que de 10 à 30 mm, selon le matériau. Si au contraire le support est plutôt dans un état hydrique loin de l'équilibre avec le milieu ambiant, la poursuite du séchage dans le support peut entraîner la création de contraintes de retrait empêché et ainsi conduire à la propagation de la fissuration. Cependant, les cycles de mouillage-séchage s'opposent à un séchage en profondeur dans la couche de réparation et, dans le cas des épaisseurs de réparation de 50 mm et de 75 mm, ils empêchent la pénétration du front de séchage et donc du retrait au-delà de l'interface.

Pour les réparations de 50 mm et de 75 mm, l'arrêt des fissures au niveau de l'interface nécessite des contraintes de traction dans le support inférieure à sa résistance. En situation de retrait empêché, avec formation d'importants gradients de déformation en surface, il a été démontré (Bissonnette, 1996) que le cœur de l'élément, et qui plus est le support, sont dans un état de contrainte de compression. La propagation des fissures relâche les déformations empêchées générées dans la réparation et par suite les contraintes de compression dans le support diminuent. Ainsi, à moins d'un séchage au-delà de l'interface en profondeur dans le support, il n'y a pas de raison que le support soit soumis à des contraintes de traction et que la fissuration s'y propage.

8.3 CONCLUSIONS SUR L'ETUDE DE LA FISSURATION

L'étude de la fissuration de surface complétée par l'étude de la fissuration interne ont permis de mieux comprendre les processus et les mécanismes de la fissuration due au retrait empêché dans les réparations minces en béton. Ils ont également permis de répondre en partie à la question posée initialement quant au risque de décollement de la réparation sous l'action du séchage. Les principaux résultats et observations se résument de la façon suivante:

- Dans les conditions de l'étude expérimentale réalisée, le séchage a entraîné la fissuration des réparations, quel que soit le matériau ou l'épaisseur.

- La fissuration du système est fonction de l'épaisseur de la réparation et de la nature du matériau de réparation. Il a été montré que, pour un matériau donné, une épaisseur importante favorise la création de fissures plus espacées, mais en contrepartie plus ouvertes. L'utilisation d'un matériau de réparation caractérisé par un retrait d'amplitude importante favorise la formation d'un réseau de fissures de densité importante comparativement à celui obtenu lors de l'utilisation d'un matériau à retrait modéré. En ce sens, l'utilisation d'un béton haute performance conduit à une fissuration moins importante (en terme de nombre de fissures et d'ouverture moyenne de fissure) que les bétons et mortiers ordinaires. Les bétons hautes performances constituent donc des matériaux de réparation ayant un potentiel de fissuration moins important que les matériaux classiques de rapport E/C plus élevé et de porosité capillaire plus importante.

- La présence de fibres d'acier en volume suffisant permet de contrôler efficacement la fissuration de retrait empêché en favorisant la création d'un réseau de nombreuses fissures très discontinues et peu ouvertes.

- Le séchage de la réparation entraîne une propagation rapide des fissures qui, après 1 an, atteignent en majorité l'interface avec le support pour l'ensemble des matériaux, excepté le mortier fibré. L'utilisation d'un béton hautes

performances ne constitue donc pas un avantage quant à la profondeur de propagation des fissures.

- Pour les réparations dont l'épaisseur est inférieure ou se situe près de l'épaisseur seuil de séchage, les fissures se propagent dans le support. Pour les autres, le développement est freiné au niveau de l'interface. Ce phénomène de propagation dans le support, lié à l'épaisseur de la réparation, est susceptible d'évoluer dans la mesure où l'épaisseur seuil de séchage pourrait être liée à l'échelle de temps considérée.

- Le séchage et le retrait empêché qui en découle n'ont pas causé le décollement de la réparation ni la création de fissures orientées parallèlement à l'interface. Ces résultats montrent ainsi que, dans le cas de la présente étude, le comportement du système réparation/support, sous l'action d'un chargement hydrique, s'est révélé monolithique.

Afin d'améliorer la compréhension des mécanismes de fissuration du système réparation/support sous l'action du séchage, il est important à ce stade de l'étude de pouvoir utiliser l'outil numérique. En effet, seul une modélisation numérique pourra nous permettre de simplifier le problème, notamment en découplant les phénomènes, afin d'en distinguer les réels effets sur la réponse mécanique et la fissuration du système.

PARTIE III :

ÉTUDE NUMÉRIQUE SUR LA FISSURATION DUE AU SÉCHAGE DANS LES RÉPARATIONS

CHAPITRE 9

RISQUE DE FISSURATION AU JEUNE ÂGE DES RÉPARATIONS MINCES EN BÉTON

Les matériaux utilisés pour réaliser les réparations in situ du projet de recherche sont soit des matériaux riches en ciment, soit des matériaux de faible rapport eau/ciment. Ce sont donc des matériaux dont le retrait endogène est important dès les premiers jours suivant la mise en place des réparations. Le risque de fissuration au jeune âge n'est donc pas négligeable. Dans cette première partie de l'étude numérique, une évaluation des contraintes causées par le retrait endogène empêché a été réalisée. Celle-ci ne prend pas en compte les phénomènes viscoélastiques tels que le fluage ou la relaxation. La modélisation mise en œuvre est basée sur une approche thermodynamique des milieux poreux réactifs (Coussy, 1995)(Ulm et coll., 1995). Un calcul du dégagement de chaleur dû à la réaction d'hydratation et un calcul de la cinétique d'hydratation ont tout d'abord été réalisés. Ensuite, à partir de ces résultats, les déformations thermiques et endogènes ainsi que les contraintes correspondantes ont été calculées. Finalement, cela a permis d'évaluer les risques de fissuration au jeune âge dans une réparation mince en béton pour chacun des matériaux de réparation utilisés in situ en les comparant avec l'évolution de leur résistance en traction obtenue en laboratoire. Les calculs ont été réalisés avec les modules TEXO et MEXO du code aux éléments finis CESAR-LCPC, développé au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

9.1 CALCUL DU DEGAGEMENT DE CHALEUR ET DE LA CINETIQUE D'HYDRATATION

9.1.1 Aspects théoriques

Le problème considéré est un problème couplé thermochimique. Il nécessite donc la résolution simultanée de l'*équation de la chaleur* (équation 1) et d'une seconde équation modélisant l'évolution dans le temps de la réaction d'hydratation, soit la *loi cinétique macroscopique d'hydratation* (équation 2). Dans l'équation de la chaleur, un terme supplémentaire a été introduit afin de prendre en compte la quantité de chaleur dégagée par la réaction d'hydratation.

La réaction d'hydratation du ciment avec l'eau est thermoactivée. La loi cinétique d'hydratation est donc basée sur une loi du type Arrhénius. Elle dépend également de l'affinité chimique $A(\xi)$ qui est la force motrice de la réaction. À l'échelle macroscopique de la modélisation, l'affinité représente le gradient qui existe entre l'eau liée chimiquement et l'eau libre, dont la diffusion à travers la couche d'hydrates serait le mécanisme qui impose la cinétique d'hydratation (Ulm et coll., 1996)[1].

$$C\frac{dT}{dt} = -divq + \ell\frac{d\xi}{dt} \qquad \text{avec: } q = -\mathrm{K}.gradT \qquad (1)$$

$$\frac{d\xi}{dt} = \widetilde{A}(\xi,T).\exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \qquad (2)$$

Les conditions aux limites sur le contour orienté par la normale n sont données par la relation (3):

$$q.n = \lambda\left(T - T_{imp}\right) \qquad (3)$$

---

[1] Le lecteur pourra se référer au Chapitre 1 de l'étude bibliographique pour plus d'information sur cet aspect

Où dans ces équations:

- C est la capacité calorifique volumique
- K = KI est le tenseur des coefficients de conductivité isotrope
- λ est le coefficient d'échange sur le contour
- T_{imp} est la température imposée de l'extérieur sur le contour
- $\ell > 0$ est la chaleur latente d'hydratation par unité de degré d'hydratation supposée constante
- E_a / R est la constante d'Arrhénius, supposée constante
- $\widetilde{A}(\xi)$ est l'affinité normalisée qui ne dépend que du degré d'hydratation et de la composition du béton utilisé

Le module TEXO est principalement un module de calcul qui résout simultanément d'une part l'équation de la chaleur (1) et d'autre part la loi cinétique macroscopique d'hydratation (2). Le module TEXO permet donc de déterminer le champ de température et le champ de degré d'hydratation en tout temps au sein de la structure.

9.1.2 Données expérimentales

L'ensemble des calculs dans le module TEXO reposent sur les résultats de l'essai calorimétrique quasi adiabatique (appelé 'essai q.a.b.') qui doivent être fournis comme paramètres d'entrée. Pour chaque matériau de réparation utilisé in situ, un essai de calorimétrie quasi adiabatique a été réalisé sur une éprouvette cylindrique de diamètre 150 mm et de hauteur 300 mm. L'essai consiste à enregistrer, en fonction du temps, la température du béton placé dans le calorimètre. Cet essai permet en outre de calculer la chaleur d'hydratation (équation 4), mais surtout de déterminer l'évolution de l'affinité normalisée (équation 5) en fonction du degré d'hydratation (équation 6) pour le béton utilisé (Coussy et coll., 1995).

$$\ell = C\left(T_{\infty}^{ad} - T_0\right) \qquad (4)$$

$$\widetilde{A}(\xi) = \frac{1}{T_\infty - T_0} \frac{dT^{ad}(t)}{dt} \exp\left(\frac{E_a}{RT^{ad}(t)} \right) \qquad (5)$$

$$\xi = \frac{T^{ad}(t) - T_0}{T_\infty^{ad} - T_0} \qquad (6)$$

La figure 9.1 présente l'évolution de la température au cœur de l'échantillon, corrigée des pertes thermiques du système de mesure. Le dégagement de chaleur des 3 matériaux est différent. Pour le mortier ordinaire une augmentation de température de 87,8°C est enregistrée, alors que pour le béton ordinaire et le béton hautes performances l'augmentation n'est respectivement que de 51,8°C et de 57,7°C. Le mortier ordinaire monte donc beaucoup plus haut en température, mais il atteint sa température asymptotique plus lentement que les deux bétons. Cela traduit une cinétique d'hydratation un peu moins rapide. Le béton hautes performances et le béton ordinaire ont des comportements thermiques similaires, avec toutefois une cinétique un peu plus rapide au très jeune âge dans le cas du béton ordinaire. Cela est fort probablement attribuable au fait que le béton hautes performances possède une quantité de ciment très proche du béton ordinaire (500 kg/m^3 avec 8% de fumée de silice contre 400 kg/m^3) et surtout contient dans sa formulation une quantité de superplastifiant plus importante ainsi qu'un adjuvant retardateur de prise. Ces deux adjuvant sont en effet reconnus pour leur action sur la cinétique de la réaction d'hydratation.

Ces résultats sont ensuite utilisés dans le module TEXO de CESAR-LCPC pour le calcul du dégagement de chaleur dû à la réaction d'hydratation et pour la détermination de l'évolution du degré d'hydratation.

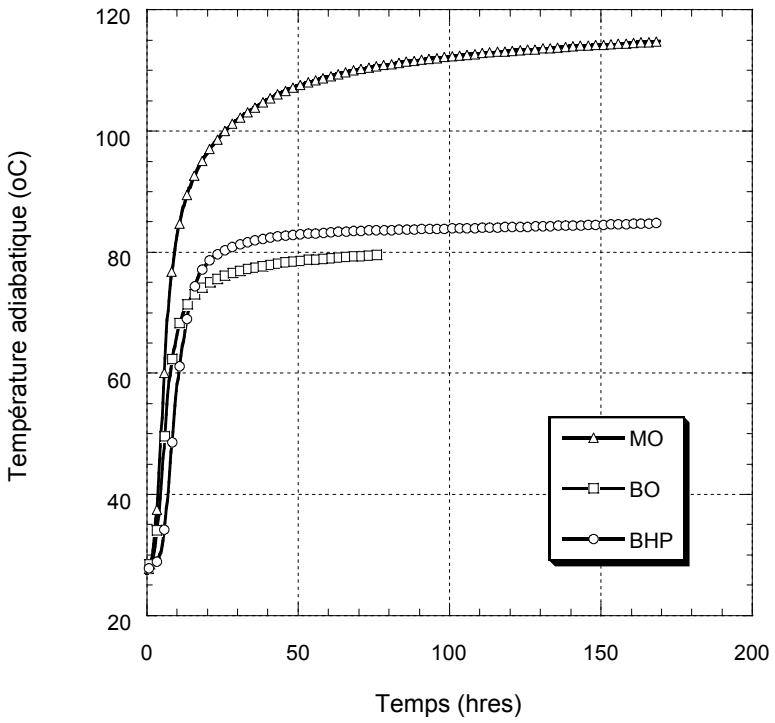


Figure 9.1: Courbe d'évolution de la température corrigée des pertes du calorimètre pour les trois matériaux de réparation

9.1.3 Simulations

Dans le cadre des réparations minces, c'est à dire pour des réparations dont l'épaisseur n'excède pas 100 mm, les gradients thermiques ne sont pas très importants et la couche de réparation se trouve rapidement à l'équilibre avec le milieu extérieur. L'épaisseur de la réparation n'est donc pas dans le cadre de cette étude un paramètre important. Seul le cas de la réparation d'épaisseur 50 mm a donc été simulé pour le calcul des contraintes dues au retrait endogène empêché.

La structure reproduite est, pour des raisons de symétrie, une demie poutre réparée de longueur 1 m. L'épaisseur du support est 0,40 m et celle de la réparation est de 0,05 m (Figure 9.2). La température extérieure est prise constante et égale à 25°C. La température initiale du support est initialisée à 20°C. Quant au matériau de réparation, sa température initiale est fixée à 25°C de façon à simuler une fabrication et une mise en place en été.

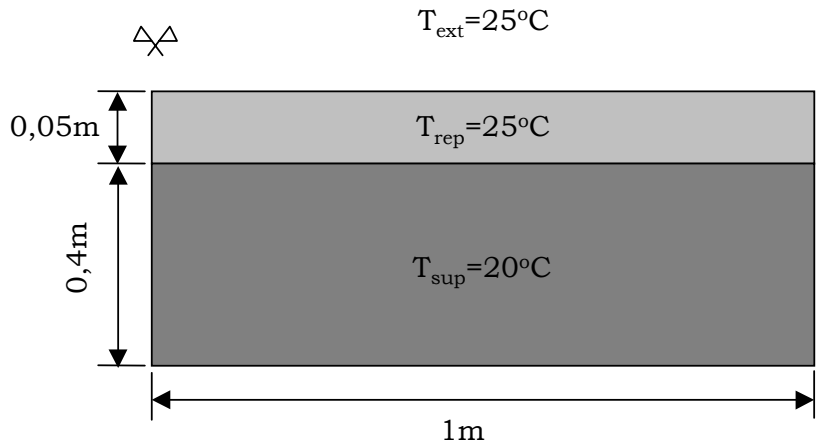


Figure 9.2: Structure et conditions aux limites simulées

Des éléments d'échange thermiques ont été placés en surface et sur le pourtour de la structure, sauf sur le côté correspondant à l'axe de symétrie. Les paramètres thermiques des différents matériaux sont donnés au tableau 9.1. Seule la chaleur d'hydratation diffère d'un matériau à l'autre. Elle est déterminée à partir des résultats de l'essai de calorimétrie adiabatique (équation 4, section 1.2). La modélisation mise en œuvre fait donc l'hypothèse que l'affinité chimique $\widetilde{A}(\xi)$, force motrice de la réaction d'hydratation, est le seul paramètre qui diffère d'un matériau à l'autre.

Tableau 9.1:Paramètres thermiques des matériaux de réparations

Paramètre	MO	BO	BHP
C (kJ/m³/°K)	2400	2400	2400
λ (kJ/h/m²/°K)	21,6	21,6	21,6
E_a/R (K)	4000	4000	4000
ℓ (kJ/m³)	210791	124319	138392

La valeur du coefficient d'échange thermique choisie correspond à une atmosphère ventilée. La constante d'Arrhenius E_a/R est un paramètre très important car c'est en partie elle qui détermine, à travers l'énergie d'activation E_a, la cinétique d'hydratation du matériau. L'énergie d'activation d'un matériau

cimentaire est en théorie non constante, surtout au très jeune âge. Son identification expérimentale étant délicate et ne faisant pas partie de nos objectifs, sa valeur a été fixée à la valeur classique de 4000 K pour les bétons courants.

9.1.4 Résultats

Les évolutions de température et de degré d'hydratation pour les différents matériaux utilisés in situ, dans le cas de l'épaisseur de réparation de 50 mm sont présentés sur les figures 9.3 et 9.4. Les évolutions sont données pour un nœud du maillage dont les coordonnées sont x=0,45 et y=0,43, c'est à dire un nœud situé au cœur de la couche de réparation. Sur la figure 9.3, l'échelle de 70 heures correspond environ au temps de mûrissement à l'eau qui a été appliqué sur les réparations in situ (cf. Chapitre 4).

Conformément aux résultats de l'essai de calorimétrie adiabatique, la montée en température du mortier ordinaire est plus rapide et plus importante au sein de la couche de recouvrement que celle des deux bétons (Figure 9.3). Le béton hautes performances et le béton ordinaire ont des comportements très similaires, ce qui était également observé lors de l'essai de calorimétrie (Figure 9.1), avec toutefois une augmentation de température plus rapide au très jeune âge dans le cas du béton ordinaire. La figure 9.3 montre également que l'équilibre thermique de la couche de recouvrement est atteint après environ 60 heures et cela pour les 3 matériaux de réparation.

Ces différences de dégagement de chaleur se traduisent par des cinétiques d'hydratation différentes pour les trois matériaux (Figure 9.4). Le béton hautes performance et le béton ordinaire développent une cinétique d'hydratation plus rapide que le mortier ordinaire, mais en revanche la réaction se stabilise plus rapidement. Ces résultats sont conformes aux observations réalisées à partir des essais de calorimétrie adiabatique.

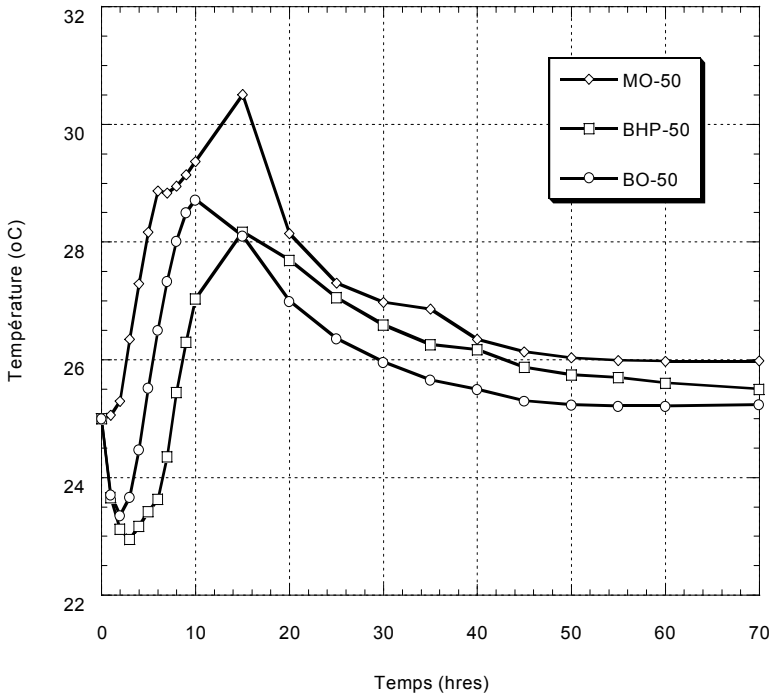


Figure 9.3: Évolution de la température au cours des 3 jours de mûrissement au cœur de la réparation pour les différents matériaux, dans le cas de l'épaisseur h=50 mm

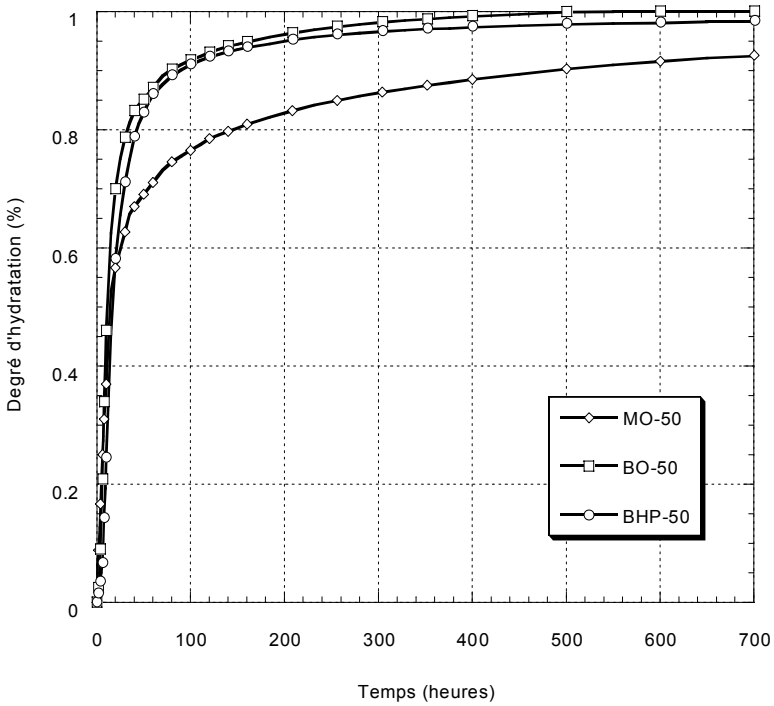


Figure 9.4: Évolution du degré d'hydratation en fonction du temps pour les différents matériaux, dans le cas de l'épaisseur de réparation h=50 mm

9.2 EVALUATION DES CONTRAINTES DUES AU RETRAIT ENDOGENE EMPECHE

9.2.1 Aspects théoriques

- Loi de comportement

Le module TEXO a permis le calcul en tout point de la structure de la température et du degré d'hydratation en fonction du temps. Le module MEXO permet de calculer à partir de ces résultats les contraintes de retrait empêché (thermique et endogène). Il s'agit principalement d'un module de résolution mécanique élastique incrémentale avec des conditions aux limites en déplacement ou en chargement. Ce module de calcul des contraintes au jeune âge ne prend pas en compte les phénomènes différés, tel que la relaxation des contraintes par fluage.

En notant $d\varepsilon = de + d\varepsilon/3$ le tenseur incrément de déformation, la loi de comportement utilisée dans le module MEXO s'écrit sous forme incrémentale :

$$d\sigma = \frac{E(\xi)}{1+\upsilon} de + \frac{E(\xi)}{3(1-2\upsilon)}\left(d\varepsilon - 3\alpha dT - 3\beta d\xi\right)\mathrm{I} \qquad (7)$$

où :

- $E(\xi)$ est le module d'élasticité qui dépend du degré d'hydratation et du module de Young du matériau durci
- est le coefficient de Poisson, supposé constant
- α est le coefficient de dilatation thermique linéique, supposé constant
- est le coefficient de dilatation chimique, supposé constant

- Prise en compte du durcissement

Les propriétés mécaniques, à savoir le module d'élasticité et la résistance en compression, dépendent de la maturité du matériau et donc de l'avancement de

la réaction d'hydratation. Le module d'élasticité dans MEXO est une fonction dépendante non pas du temps mais du degré d'hydratation.

Pour l'évolution du module d'élasticité $E(\xi)$, la loi de Byfors (Byfors, 1980) a été adaptée et mise sous la forme :

$$E(\xi) = E(\infty) f(\xi) \tag{8}$$

avec

$$f(\xi) = \frac{1 + 1{,}37 R_c(\infty)^{2{,}204}}{1 + 1{,}37 R_c(\xi)^{2{,}204}} \left(\frac{R_c(\xi)}{R_c(\infty)} \right)^{2{,}675} \tag{9}$$

$$R_c(\infty) = \left(\frac{E(\infty)}{7250} \right)^{\frac{1}{0{,}471}} \tag{10}$$

où :

- $E(\infty)$ est le module de Young du matériau durci (hydratation terminée)
- $R_c(\infty)$ est la résistance en compression du matériau durci
- $R_c(\xi)$ est l'évolution de la résistance en compression en fonction du degré d'hydratation

Pour l'évolution de la résistance en compression en fonction du degré d'hydratation, une relation bilinéaire est utilisée :

$$R_c(\xi) = \begin{cases} \xi R_{c0} & si : \xi \leq \xi_0 \\ (R_c(\infty) - R_{c0}) \dfrac{\xi - \xi_0}{1 - \xi_0} + R_{c0} & si : \xi > \xi_0 \end{cases} \tag{11}$$

avec :

$$R_{c0} = \frac{\xi_0 R_c(\infty)}{10} \tag{12}$$

ξ_0 est le seuil d'hydratation à partir duquel le matériau peut être considéré comme un matériau solide. Les deux seules données nécessaires se réduisent donc à $E(\infty)$, le module de Young du matériau durci, et ξ_0, le seuil d'hydratation.

Cette modélisation du durcissement d'un matériau cimentaire a été validée pour différents bétons ordinaires ou à hautes performances (le lecteur pourra se référer au manuel d'exemples du progiciel CESAR-LCPC dans la partie « Modélisation du béton au jeune âge »).

- Calcul des déformations de retrait endogène

Dans le module MEXO, la déformation incrémentale de retrait endogène est corrélée par un coefficient β, appelé « coefficient de retrait chimique », à l'incrément de degré d'hydratation calculé dans le module TEXO (équation 13).

$$d\varepsilon^c = \beta d\xi \qquad (13)$$

β est positif dans le cas d'un gonflement chimique libre et isotherme, et négatif dans le cas d'un retrait. Ce coefficient est éventuellement non constant, mais est supposé constant dans une première approche (Laplante, 1993). β correspond donc au retrait endogène ultime mesuré pour le matériau. Cela revient, pour des valeurs faibles du degré d'hydratation à surestimer le retrait endogène.

9.2.2 Données expérimentales

Les seules données expérimentales nécessaires pour la modélisation du durcissement du matériau sont le module de Young à hydratation terminée $E(\infty)$ et le seuil d'hydratation ξ_0 (Tableau 9.2). Les modules utilisés sont ceux correspondant aux valeurs mesurées en laboratoire après 90 jours de mûrissement à l'eau, âge pour lequel l'hydratation est considérée comme terminée ou très faiblement active.

Les paramètres nécessaires au calcul des déformations thermiques et chimiques sont donnés au tableau 9.3. La déformation de retrait endogène à l'infini ξ_{∞}^{c} correspond à la valeur de stabilisation des déformations endogènes mesurées en laboratoire sur des prismes de 100x100x350 mm scellés avec 2 couches de papier aluminium adhésif et conservés à température constante de 23°C. Cette déformation à l'infini est sous estimée dans la mesure où les déformations de retrait ont été suivies en laboratoire seulement à partir de 24 heures.

Tableau 9.2: Paramètres pour la prise en compte du durcissement

Paramètre	MO	BO	BHP
ξ_0 (-)	0,05	0,05	0,1
E_{∞} (GPa)	31000	35000	48000

Tableau 9.3: Paramètres pour le calcul des déformations thermiques et de retrait endogène

Paramètre	MO	BO	BHP
υ	0,2	0,2	0,2
α	1.10^{-5}	1.10^{-5}	1.10^{-5}
ξ_{∞}^{c}	300.10^{-6}	80.10^{-6}	150.10^{-6}

9.2.3 Simulations

La structure simulée possède la même géométrie que celle utilisée pour le calcul thermique, à savoir une demie poutre de longueur 1 m et de hauteur 0,40 m pour la partie correspondant au support, surélevée de la couche de réparation d'épaisseur 0,05 m. La Figure 9.5 présente le maillage utilisé pour les calculs mécaniques dans le module MEXO ainsi que les conditions limites en déplacement qui ont été imposées. Les calculs sont réalisés avec l'hypothèse des contraintes planes. Pour cette étude des contraintes dues au retrait endogène

empêché, dans la mesure où le calcul est élastique, l'adhérence entre les 2 couches, réparation et support, est supposée parfaite. C'est à dire que la continuité des déplacements est assurée.

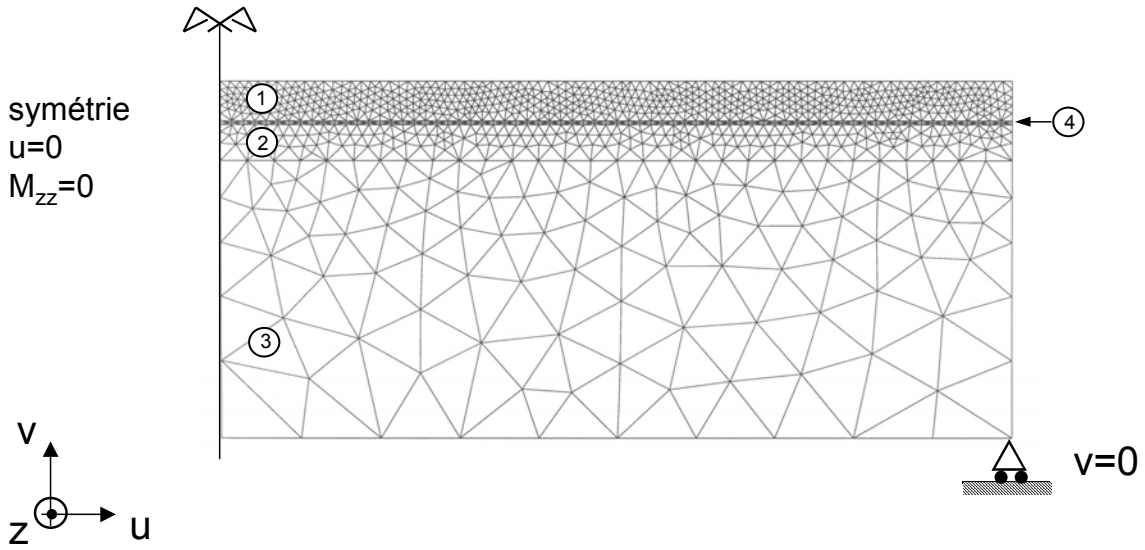


Figure 9.5: Maillage de la structure et conditions aux limites imposées (1: réparation, 2 et 3: support, 4: interface)

9.2.4 Résultats

- Déformations engendrées par le retrait endogène

La Figure 9.6 montre la déformée obtenue pour la réparation en mortier ordinaire après 1000 heures de calculs, temps pour lequel le degré d'hydratation est maximal. Le retrait endogène provoque un « tuilage » de la poutre. Ce tuilage est restreint par la présence du support beaucoup plus rigide et dont l'hydratation est inactive. Ces déformations empêchées sont une source de contraintes importantes.

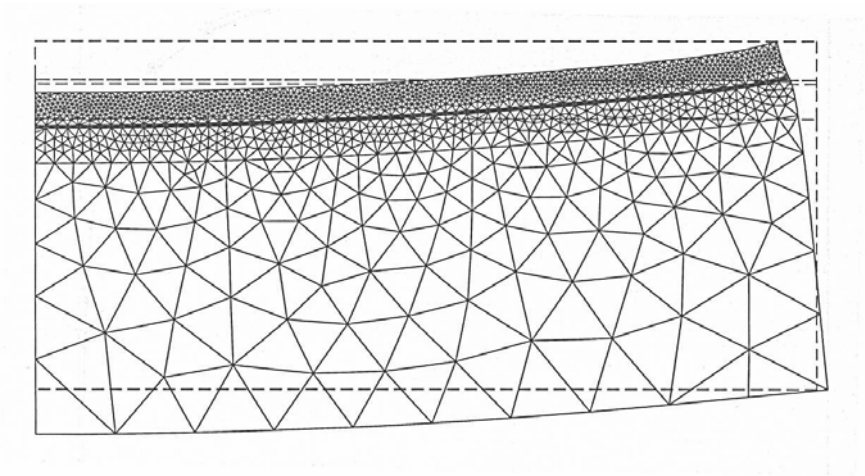


Figure 9.6: Déformée après 1000 heures d'hydratation

- Distribution des contraintes dans l'élément réparé

Les contraintes obtenues sont essentiellement des contraintes de traction horizontales, orientées parallèlement à l'interface entre la réparation et le support si l'on se place loin des zones de régularisation que sont les bords. Le retrait endogène n'induit pas de contraintes de cisaillement importantes.

La Figure 9.7 présente la distribution des contraintes normales dues au retrait endogène empêché pour la réparation en mortier ordinaire, suivant une coupe verticale placée à l'abscisse x=0,5 m depuis l'axe de symétrie de la demie poutre.

Dans la couche de réparation, aucun gradient de contrainte significatif n'est observé. Ce résultat était attendu puisque l'épaisseur de la réparation ne permet pas la mise en place d'un gradient de température suffisant pour provoquer une hydratation différentielle. Toute la couche de réparation se trouve dans un état de contrainte de traction dès le très jeune âge du matériau. Le support est quant à lui dans un état de contraintes de compression proche de l'interface, en réaction aux contraintes de traction engendrées par le retrait dans la couche de réparation. Sur la face inférieure le support est soumis à des contraintes de traction de façon à assurer l'équilibre de la section. Dans ces calculs, les

contraintes sont probablement surestimées dans la mesure où la relaxation par fluage et par microfissuration n'est pas prise en compte.

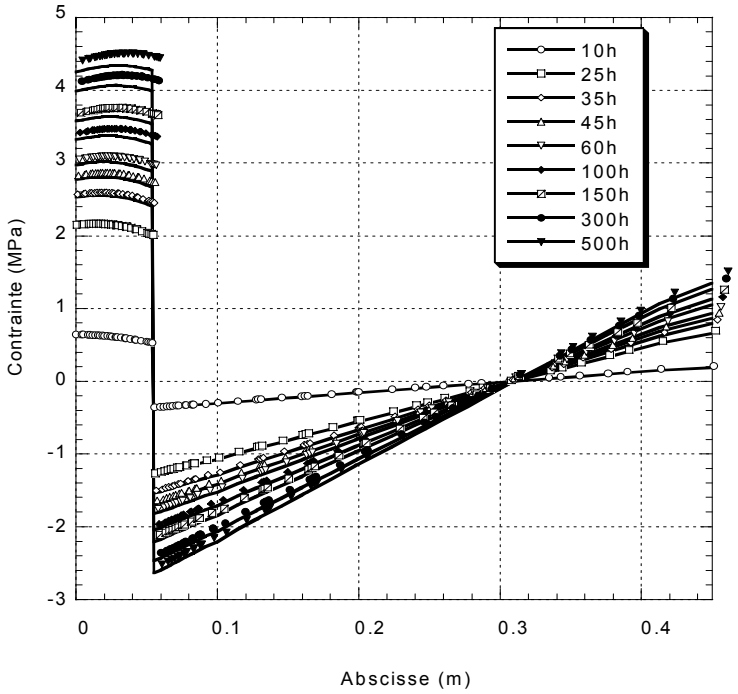
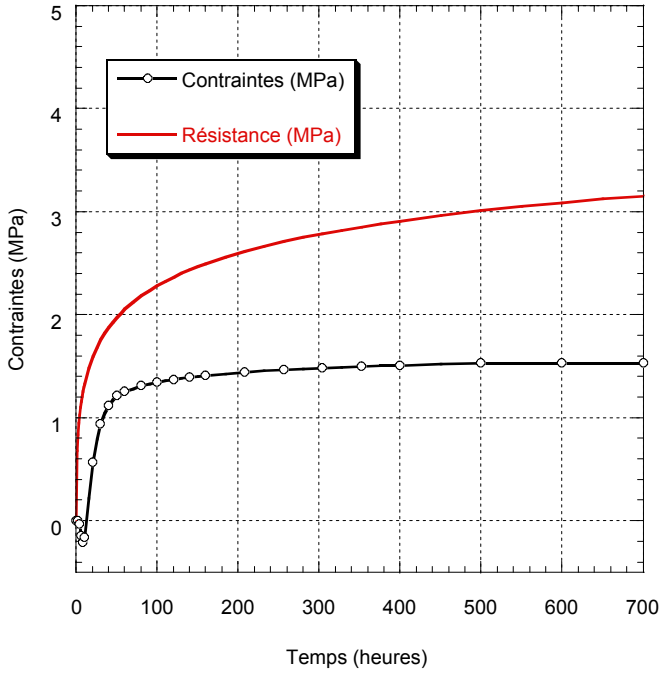


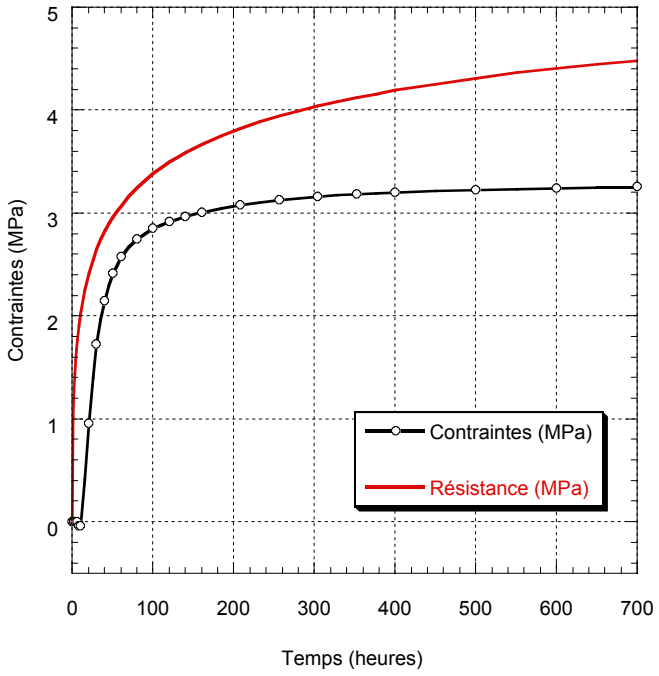
Figure 9.7: Profil des contraintes dues au retrait endogène empêché pour la réparation en mortier ordinaire d'épaisseur 50 mm

- Risque de fissuration

Afin d'évaluer le risque de fissuration, les contraintes dues au retrait endogène empêché ont été comparées à la résistance en traction du matériau. Les Figures 9.8 et 9.9 montrent l'évolution des contraintes normales σ_{xx} en fonction du temps pour un nœud du maillage situé au cœur de la réparation. La Figure 9.9b correspond à un agrandissement sur 70 heures de la Figure 9.9a. La courbe représentant la résistance en traction correspond à un lissage des résultats expérimentaux obtenus par fendage à différentes échéances (cf. Partie II/ Chapitre 5).

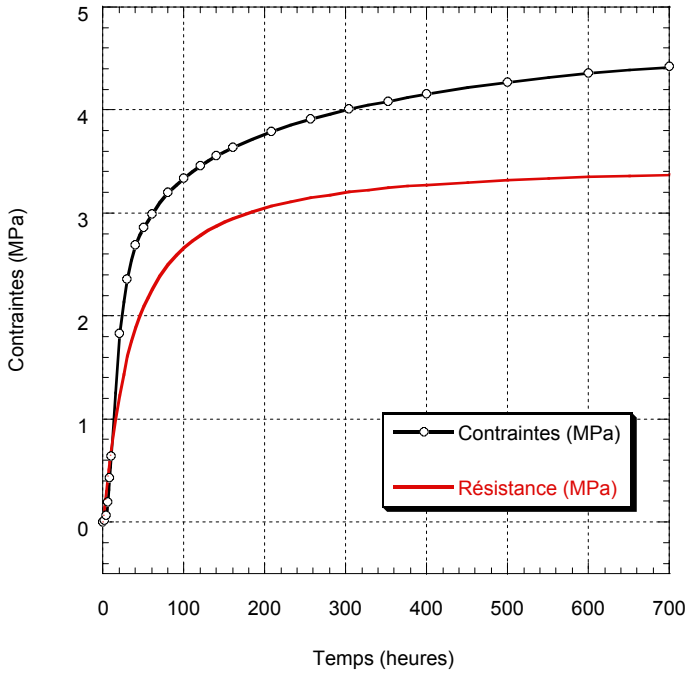


(a)

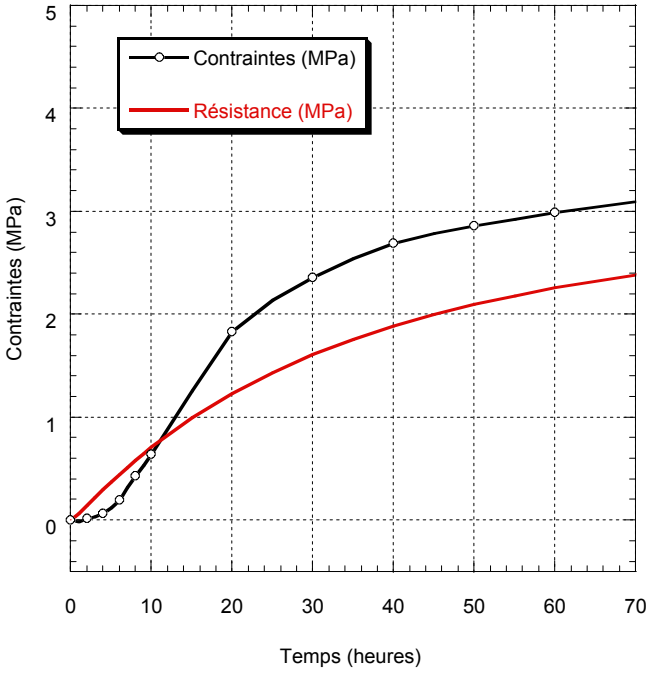


(b)

Figure 9.8: Risque de fissuration au jeune âge de la réparation en béton ordinaire (a) et en béton hautes performances (b) d'épaisseur h=50 mm



(a)



(b)

Figure 9.9: Risque de fissuration au jeune âge de la réparation en mortier ordinaire d'épaisseur h=50 mm ((b): agrandissement de (a) sur 70 heures)

Les résultats montrent que seule la réparation en mortier ordinaire présente un risque de fissuration au jeune âge important. En effet la résistance en traction est dépassée dès le dixième jour suivant la mise en place de la réparation (Figure 9.9b). Cela est attribuable au fait que ce matériau comporte un volume de pâte et un dosage en ciment beaucoup plus importants que les deux autres matériaux. Les déformations de retrait endogène sont nettement plus importantes, conduisant ainsi à des contraintes de traction pouvant rapidement dépasser la résistance du matériau.

9.3 CONCLUSION

Dans ces calculs, les phénomènes viscoélastiques ne sont pas pris en compte. Cela conduit peut-être à surestimer les contraintes et donc le risque de fissuration au jeune âge dans les réparations minces en béton. Il faut cependant également remarquer que les déformations de retrait endogène sont sous-estimées puisque leur calcul est basé sur des mesures occultant les 24 premières heures. Cela conduit à l'inverse sous-estimer les contraintes et le risque de fissuration. Ces résultats sont donc à prendre avec précaution compte tenu des hypothèses fortes réalisées. Toutefois, cette étude numérique montre clairement les risques de fissuration qui peuvent survenir dès les premiers jours suivant la mise en place de la réparation lorsque celle-ci est réalisée avec des matériaux de faible rapport eau/ciment ou à haute teneur en ciment développant un retrait endogène important. Cette étude montre également que lors de l'arrêt de la cure humide, c'est à dire après 3 jours, et au début des échanges hydriques avec l'extérieur, le matériau de réparation se trouve déjà dans un état de contraintes de traction important. Le chargement supplémentaire induit par le séchage risque alors de provoquer une fissuration rapide de la réparation.

CHAPITRE 10

SÉCHAGE ET CONTRAINTES INDUITES PAR LE SÉCHAGE DANS UNE RÉPATATION MINCE EN BÉTON

Avant d'étudier la fissuration due au séchage, il est important d'étudier le séchage et l'état de contrainte induit par le séchage dans une réparation mince. Dans cette partie de l'étude numérique, un modèle de transport de l'eau dans les matériaux cimentaires basé sur une loi de diffusion du type Fick a été mis en œuvre. Ce modèle a permis d'obtenir, sous différentes conditions, le profil de teneur en eau au cours du séchage dans une réparation de différentes épaisseurs et constituée de différents matériaux. Par la suite, un calcul mécanique linéaire élastique a été réalisé à partir de ces résultats pour évaluer le profil des contraintes et le risque de fissuration dans une réparation mince soumise à un chargement hydrique.

10.1 SECHAGE D'UN SYSTEME REPARATION-SUPPORT

10.1.1 Aspects théoriques du modèle de séchage utilisé

Le modèle de transport de l'humidité dans le béton qui a été utilisé est le modèle de Mensi et Acker (Mensi et coll., 1988) implanté dans le module HEXO du progiciel CESAR-LCPC. Ce modèle repose sur les hypothèse suivantes :

- L'espace poreux est indéformable
- La température est constante au cours du séchage
- La pression du mélange (air sec + vapeur) est constante et égale à la pression atmosphérique

Ces hypothèses permettent de ramener les trois lois physiques décrivant le séchage, c'est à dire :

- Le changement de phase eau-vapeur
- La diffusion de la vapeur
- La diffusion de l'eau

à une seule équation de diffusion non linéaire de la teneur en eau libre au sein du matériau. Ces hypothèses permettent également de supprimer les effets mécaniques (déformations, contraintes) dans le processus de séchage.

Soit Ω un volume de la structure étudiée et $\partial\Omega$ sa frontière. L'équation de diffusion s'écrit :

$$\frac{dC}{dt} = -div\omega \qquad \text{avec} \quad \omega = -D(C).grad(C) \qquad (1)$$

où :

- C est la teneur en eau libre du matériau (kg/m^3)
- $D(C)$ est le tenseur des coefficients de diffusion isotrope (m^2/s)
- ω est le vecteur flux de teneur en eau à travers la surface orientée par la normale n à la frontière $\partial\Omega$.

Sur la frontière, les conditions aux limites s'écrivent par la relation suivante :

$$\omega.n = \lambda(C)(C - C_{eq}) \qquad (2)$$

où :

- $\lambda(C)$ est le coefficient d'échange (m/s)
- C_{eq} est la teneur en eau à l'équilibre avec l'extérieur (kg/m^3)

La non linéarité de la diffusion vient d'une part du coefficient de diffusion $D(C)$ et d'autre part du coefficient d'échange $\lambda(C)$ qui dépendent tous les deux de la teneur en eau C du matériau.

Dans le modèle de Mensi et Acker, le coefficient de diffusion et le coefficient d'échange sont donnés sous la forme suivante :

$$D(C) = A\exp(BC) \qquad (3)$$

$$\lambda(C) = \beta \frac{1-h_{ext}}{(C_{eq}-C_{100})^2}\left(C-\left(2C_{100}-C_{eq}\right)\right) \qquad (4)$$

où :

- A, B et β sont des constantes
- h_{ext} est l'humidité relative imposée à la surface
- C_{100} est la teneur en eau libre à la saturation (h=100%) (kg/m³)

10.1.2 Données expérimentales nécessaires au modèle de diffusion

Les données nécessaires au modèle de diffusion du module HEXO sont les teneurs en eau libre du matériau C_{100}, C_{ini} et C_{eq}, les constantes du coefficient de diffusion A et B ainsi que la partie constante du coefficient d'échange (équation 5) :

$$ECH = \beta \frac{(1-h_{ext})}{(C_{eq}-C_{100})^2} \qquad (5)$$

- *Définition des teneurs en eau libre*

Les teneurs en eau libre doivent théoriquement être déterminées à partir d'une courbe de sorption isotherme pour le béton considéré. C_{100} est la teneur en eau à la saturation tandis que C_{ini} est la teneur en eau libre du matériau non saturé. Il s'agit en fait de la teneur en eau du béton durci après hydratation.

En première approximation, C_{ini} peut être déterminée à partir de la relation suivante :

$$C_{ini} = E_0 - k\alpha c_0 \qquad (5)$$

où :

- E_0 est la quantité d'eau initiale du mélange (kg/m³)
- c_0 est la quantité de ciment initiale du mélange (kg/m³)
- α est le degré d'hydratation (-)
- k est la quantité d'eau consommée par unité de ciment hydraté (-)

Ne disposant pas de la courbe de sorption isotherme des matériaux de réparation utilisés, la teneur en eau à la saturation C_{100} et celle correspondante à l'humidité relative extérieure, C_{eq}, doivent être approximées. Mensi et Acker (1988) proposent d'approcher, dans le domaine d'humidité relative (50%-100%), la courbe de sorption isotherme des matériaux cimentaires par une parabole (équation 6) :

$$h = 1 - (1 - h_{ext}) \frac{(C - C_{100})^2}{(C_{eq} - C_{100})^2} \qquad (6)$$

où :

- h est l'humidité relative au sein du matériau
- h_{ext} est l'humidité relative extérieure

Les teneurs en eau à saturation et à l'équilibre peuvent alors être déterminer en première approximation par les relations suivantes :

$$\frac{C_{100}}{C_{ini}} = 1{,}5 - \frac{E_0}{c_0} \geq 1{,}0 \qquad (7)$$

$$C_{eq} \approx C_{100}\left(1 - 1{,}2\frac{E_0}{c_0}\sqrt{2(1 - h_{ext})}\right) \qquad (8)$$

Les valeurs des constantes utilisées pour les 3 matériaux de réparation et le support sont données dans le tableau 10.1.

Tableau 10.1: Paramètres et teneurs en eau libre des différents matériaux

	MO	BO	BHP	SUPPORT
E_0 (kg/m³)	251	159	147	151
k	0,21	0,21	0,21	0,21
α	0,85	0,90	0,75	0,95
C_{ini} (kg/m³)	138	84	67	88
C_{100} (kg/m³)	152	93	81	92
C_{eq} (kg/m³)	95	58	59	53
$\Delta C = C_{ini} - C_{eq}$	43	26	8	35

On note ainsi que du fait de la formulation des ces matériaux, la variation de la teneur en eau entre le début du séchage et l'équilibre avec une humidité extérieure $h_{ext} = 70\%$, est beaucoup plus importante pour le mortier ordinaire que pour les deux autres matériaux. Le béton hautes performances est le matériau dont la variation potentielle de teneur en eau est la plus faible.

- *Paramètres de la loi de diffusion de Mensi et Acker*

Les paramètres A et B de la loi qui exprime le coefficient de diffusion D en fonction de la teneur en eau C déterminent la cinétique de séchage. Ce sont donc des paramètres très influants sur les résultats de teneurs en eau obtenus après résolution de l'équation de diffusion. Des études antérieures réalisées avec la loi de Mensi et Acker (Mensi, 1989)(Granger, 1994) montrent que le paramètre B peut être pris égal à 0,05. A devient alors le seul paramètre à identifier.

Ce paramètre est difficile à identifier expérimentalement car cela nécessite des expériences longues et difficiles à mettre en œuvre. La détermination exacte de ce

coefficient n'étant pas l'objectif de ce projet de recherche, les méthodes de détermination numériques ont été retenues.

La première méthode consiste à reproduire un essai de séchage réalisé sur une éprouvette en laboratoire et dont l'évolution de la perte de masse dans le temps est connue. Il faut alors caler le paramètre A de façon à retrouver la même perte de masse par simulation du même essai. Après plusieurs tentatives infructueuses, cette méthode a été écartée et une méthode d'identification numérique par utilisation des réseaux de neurones a été retenue.

Pour cela, toutes les utilisations de la loi de Mensi et Acker réalisées pour simuler le séchage du béton ont été répertoriées et utilisées pour la phase d'apprentissage du réseau de neurones. Par la suite, les paramètres d'entrée propres aux matériaux utilisés dans cette étude ont été introduits et le réseau de neurones a alors fourni par interpolation la valeur du paramètre de diffusion A pour chacun des matériaux. Le réseau de neurones utilisés est un réseau à trois couches (figure 10.1). La couche d'entrée comporte 2 neurones représentant les entrées, la couche intermédiaire possède 3 neurones et la couche de sortie un neurone représentant le paramètre A recherché. Les deux entrées sont les teneurs en eau C_{ini} et C_{eq}. L'algorithme utilisé est un algorithme à rétropropagation.

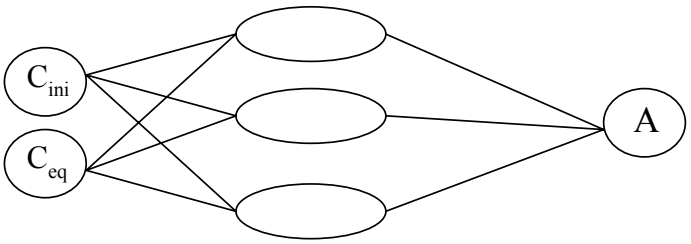


Figure 10.1: Réseau de neurones utilisés pour la détermination du paramètre A

Les valeurs obtenues ont été arrondies à 1.10^{-13} près. Elles sont présentées dans le tableau 10.2. Elles semblent cohérentes avec le comportement hydrique observé en laboratoire pour ces trois matériaux. Le mortier ordinaire est, parmi les 3 matériaux de réparation, le matériau dont le volume de pâte est le plus important et qui séchera donc le plus rapidement à rapport E/C égal de 0,40. Il a donc la valeur de A la plus élevée. Le béton ordinaire possède le même rapport eau/ciment et la même matrice que le mortier, mais les granulats ont un effet de dilution sur le paramètre de diffusion. D'où une valeur moins élevée pour le paramètre A du béton ordinaire. Le béton hautes performances est le matériau qui, de part son plus faible rapport eau/ciment et la présence de fumée de silice dans sa composition, a la matrice la plus dense et donc le paramètre de diffusion le plus faible. Enfin, le matériau du support étant très proche du béton ordinaire en terme de volume de pâte et de rapport E/C, son paramètre de diffusion est identique.

Tableau 10.2: Paramètres de la loi de Mensi et Acker

	MO	BO	BHP	SUPPORT
A ($m^2.s^{-1}$)	3.10^{-13}	2.10^{-13}	1.10^{-13}	2.10^{-13}

- *Coefficient d'échange*

Le coefficient d'échange λ dépend non seulement de la teneur en eau libre, mais également des conditions d'échange. Cette dépendance est introduite par la définition du paramètre ECH définie par la relation suivante :

$$ECH = \beta \frac{1 - h_{ext}}{\left(C_{eq} - C_{100}\right)^2} \qquad (8)$$

Pour les faces étanches de la réparation, à savoir les faces latérales, le coefficient d'échange a été pris égal à 0. Pour la face supérieure, face d'échange avec l'extérieur, le coefficient d'échange a été fixé à 3.10^{-9} m/s, valeur qui correspond à une atmosphère ventilée.

10.1.3 Validation du modèle de séchage et du choix des paramètres de diffusion

Afin de vérifier la réponse du modèle de diffusion avec les valeurs du paramètre de diffusion A déterminées pour chacun des matériaux, nous avons comparé l'évolution dans le temps de la perte de masse calculée avec le modèle et celle issue d'un essai en laboratoire. Pour cela, nous avons reproduit le séchage d'une éprouvette de 100x100x350 mm séchant à une humidité relative de 50% et à une température constante de 23°C. Les résultats exprimés en perte de masse relative en fonction du temps sont donnés sur la figure 10.2. Au moment des simulations, les mesures étaient réalisées pour une durée de séchage d'un peu moins de 300 jours, ce qui explique la durée de 300 jours utilisée dans les calculs.

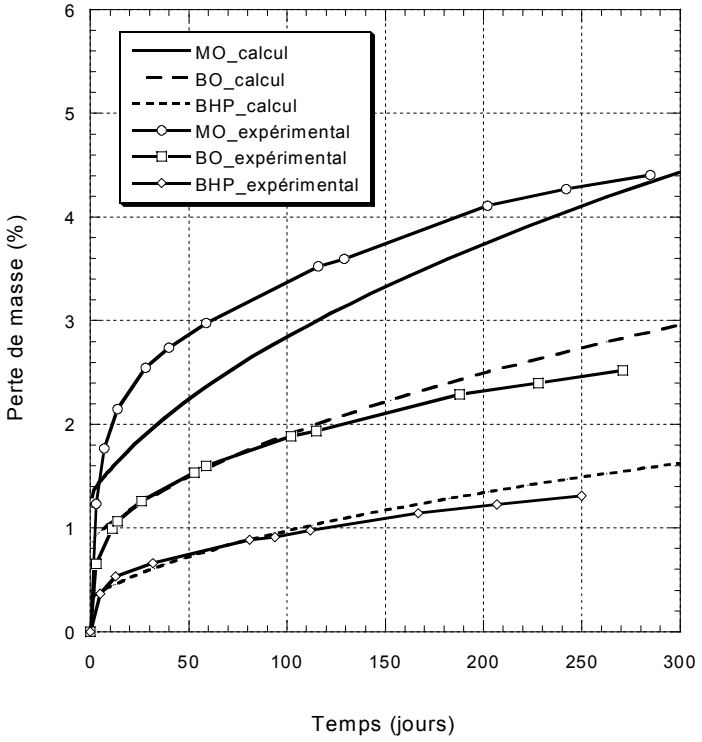


Figure 10.2: Évolution de la perte de masse relative en fonction du temps de séchage pour les trois matériaux (H.R.=50 %, T=23°C)

La figure 10.2 montre une assez bonne adéquation entre la réponse du modèle et les mesures expérimentales pour la durée de séchage simulée. Il semble cependant qu'à plus long terme le modèle a tendance à surestimer le séchage. De plus, dans le cas du mortier ordinaire, la perte de masse est quelque peu sous-

estimée à court terme. Toutefois, dans le cadre de cette étude du comportement mécanique et de la fissuration des réparations minces en béton soumises au séchage, ces résultats nous ont paru tout à fait satisfaisants dans la mesure où l'objectif était de mieux comprendre les mécanismes de fissuration et non pas de prédire une durée de vie pour les réparations simulées.

10.1.4 Maillage, conditions aux limites et simulations effectuées

La structure reproduite est, pour des raisons de symétrie, une demie poutre réparée de longueur 1 m. L'épaisseur du support est 0,40 m et celle de la réparation est de 0,025, 0,050 ou 0,075 m. L'humidité extérieure est prise constante et égale à 70%, ce qui correspond à l'humidité moyenne annuelle au Québec et également à l'humidité moyenne enregistrée sur le site d'exposition des réparations. Les calculs sont effectués en conditions isothermes. Le maillage et les conditions aux limites sont présentés sur la figure 10.3.

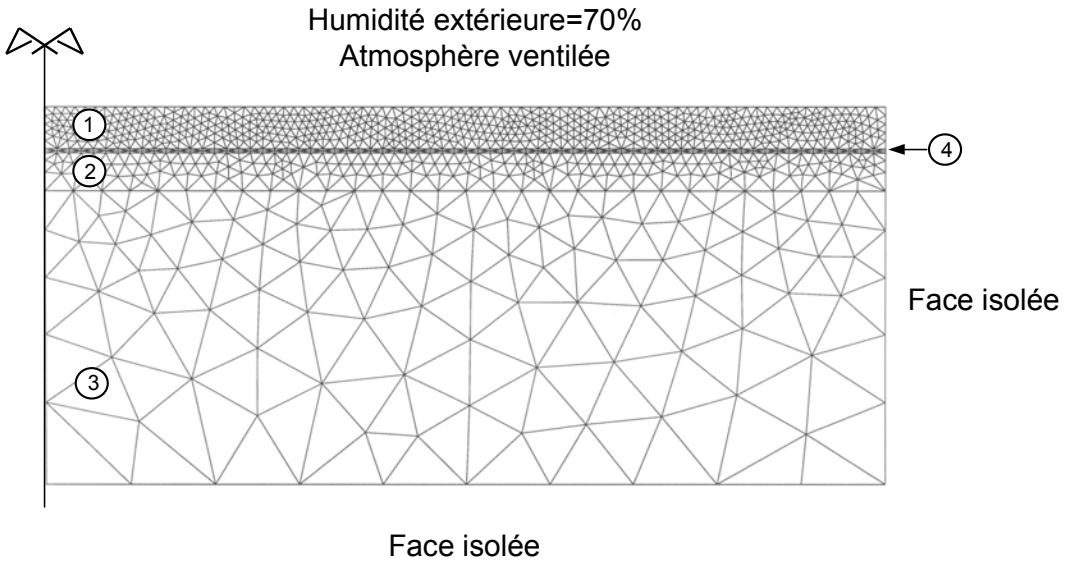


Figure 10.3: Maillage (épaisseur de la réparation: 50 mm) et conditions aux limites de la structure étudiée (1: réparation, 2 et 3: support, 4: interface)

Les problèmes étudiés dans cette partie de l'étude sont tout d'abord le séchage du matériau de réparation sans considérer possible les échanges d'humidité avec le support. Le teneur en eau libre du support est alors fixée à sa valeur à l'équilibre avec l'humidité extérieure et sa diffusivité hydrique A est fixée à 0. Cela a permis

de dégager l'influence respective de l'épaisseur de la réparation et de la nature du matériau de réparation sur l'importance du séchage dans la couche de recouvrement.

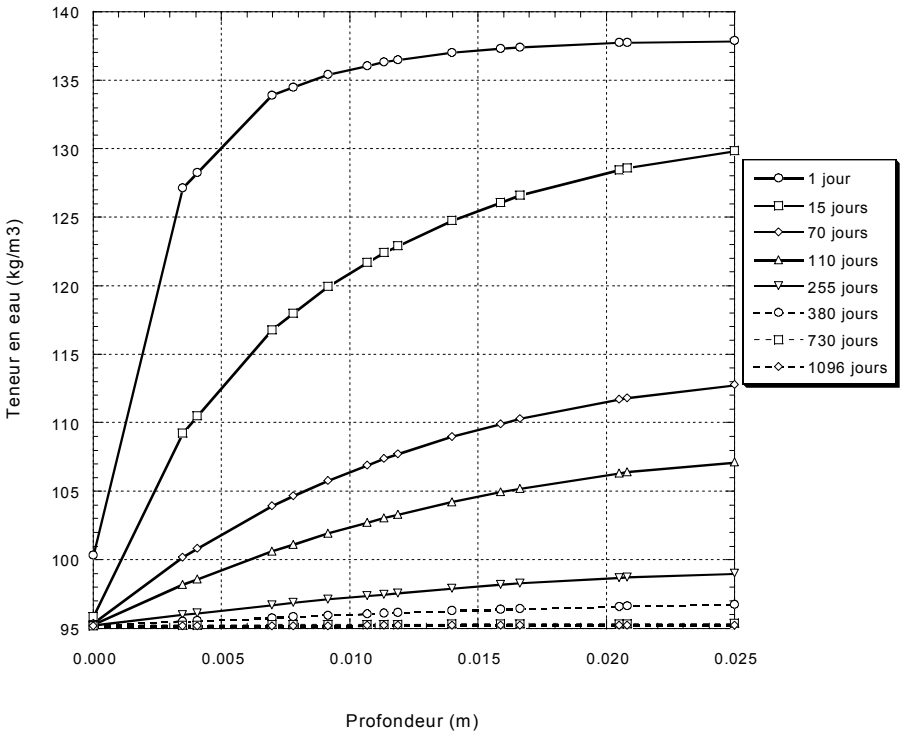
Dans une seconde partie, le problème du pompage de l'eau du matériau de réparation par le support a été étudié. En effet, le support est un matériau à l'équilibre avec l'extérieur et donc à une teneur en eau inférieure dans la majorité des cas à celle de la réparation. Le profil de teneur en eau dans la réparation peut donc être affecté par la capacité qu'à le support à « pomper » une partie de l'eau du matériau avec lequel il est en contact. Au plan numérique, la teneur en eau du support est alors fixée à sa valeur à l'équilibre C_{eq} et sa diffusivité hydrique A est fixée à la valeur de 2.10^{-13}m.s^{-1} (tableau 10.2).

Enfin, dans une dernière partie, des calculs de séchage ont été effectuées en supposant les teneurs en eau de la réparation et du support égales. Ce qui revient à considérer possible la poursuite du séchage dans le support. Ces calculs ont par la suite servi essentiellement à l'étude de la fissuration due au séchage et à l'étude de sa propagation éventuelle dans le support (Chapitre 11).

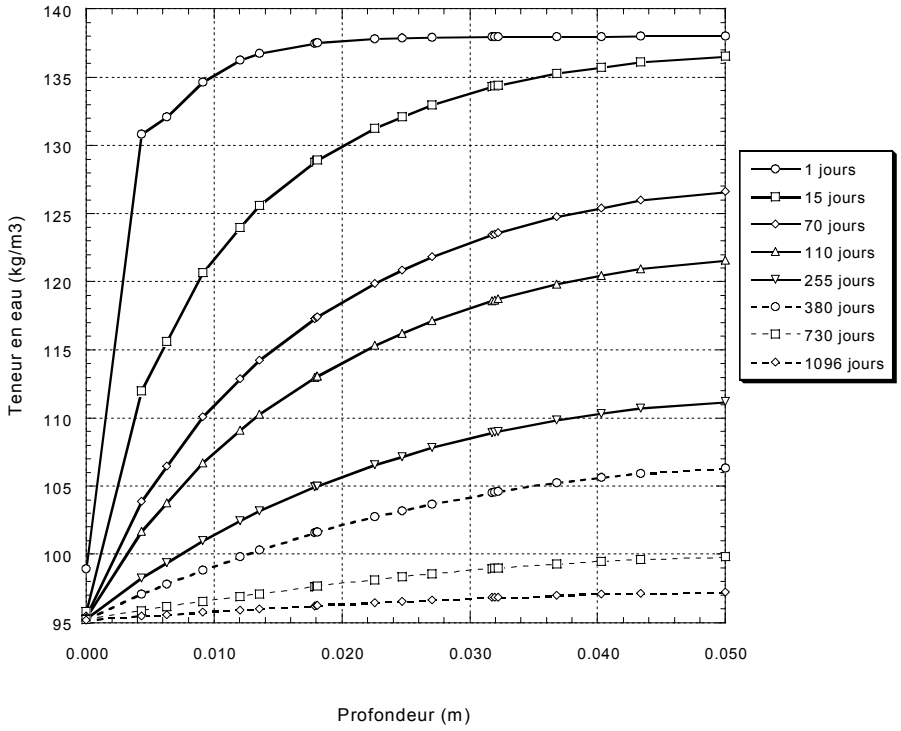
10.1.5 Résultats

- *Influence de l'épaisseur de la réparation*

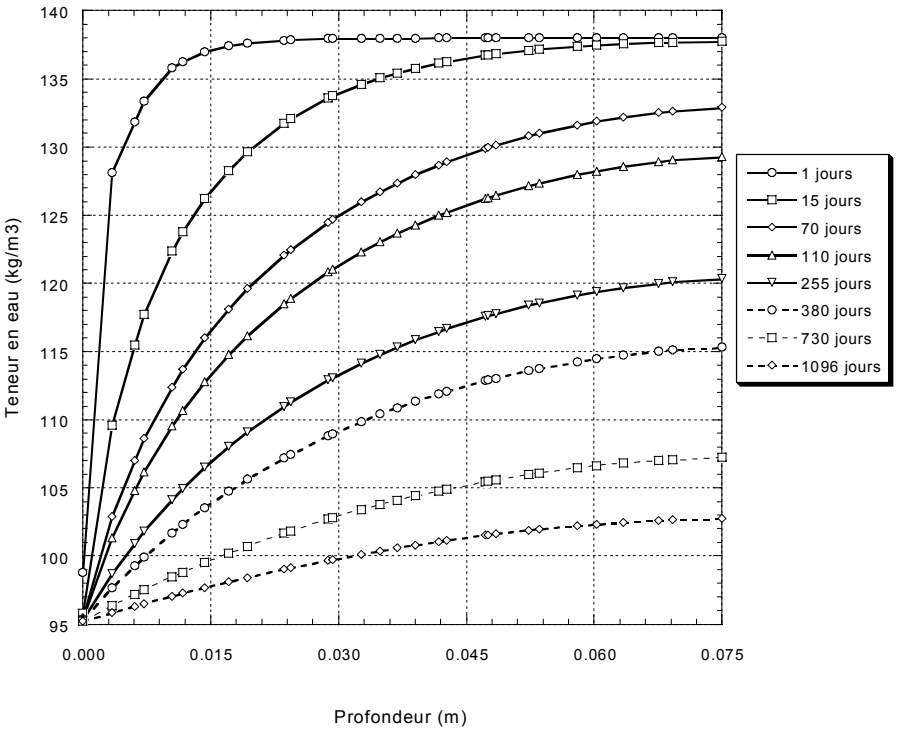
Les figures 10.4a, 10.4b et 10.4c présentent les profils de teneur en eau au cours du temps obtenus avec le mortier ordinaire pour les trois épaisseurs de réparation en considérant impossibles les échanges d'humidité avec le support. Au cours des premiers jours de séchage, d'importants gradients de teneur en eau sont générés indifféremment de l'épaisseur de la réparation. Ils seront sources de contraintes importantes en surface de la réparation. En revanche, plus l'épaisseur est grande et plus le séchage dans la réparation reste superficiel, c'est à dire moins vite l'interface sera soumise à un séchage important. Proche de l'interface, pour que la moitié de la teneur en eau libre du mortier soit perdue, il faut attendre pour l'épaisseur de 25 mm, 50 mm et 75 mm respectivement 70 jours, 255 jours et 380 jours de séchage.


Teneur en eau (kg/m3)
Profondeur (m)
140
135
130
125
120
115
110
105
100
95
0.000
0.005
0.010
0.015
0.020
0.025
1 jour
15 jours
70 jours
110 jours
255 jours
380 jours
730 jours
1096 jours

(a)


Teneur en eau (kg/m3)
Profondeur (m)
140
135
130
125
120
115
110
105
100
95
0.000
0.010
0.020
0.030
0.040
0.050
1 jours
15 jours
70 jours
110 jours
255 jours
380 jours
730 jours
1096 jours

(b)



(c)

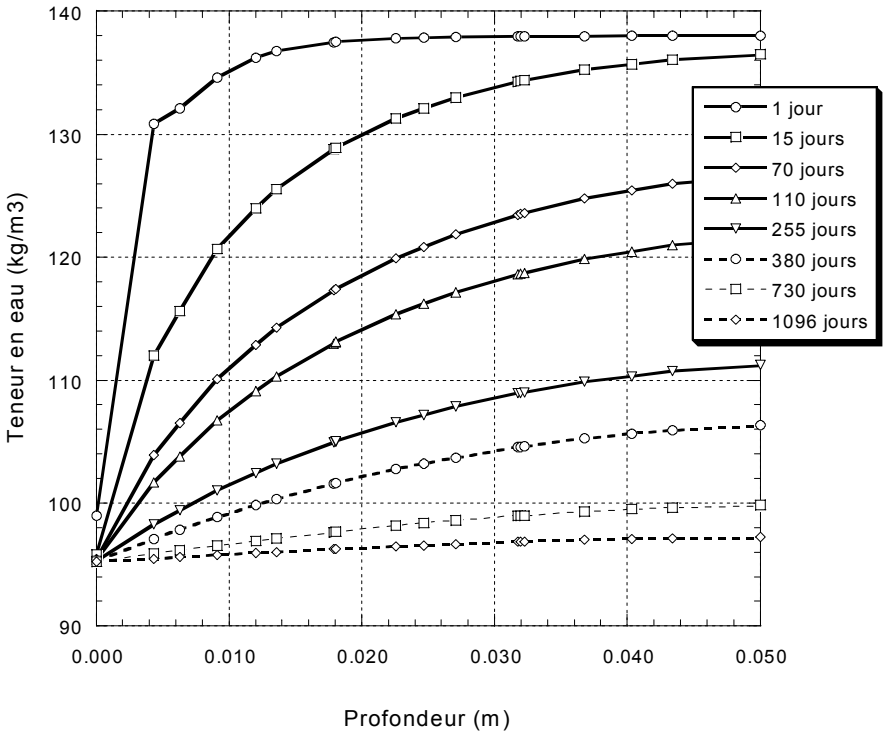
Figure 10.4: Profils de teneur en eau dans la réparation en mortier ordinaire en fonction du temps (a: épaisseur 25 mm, b: épaisseur 50 mm, c: épaisseur 75 mm)

- *Influence de la nature du matériau*

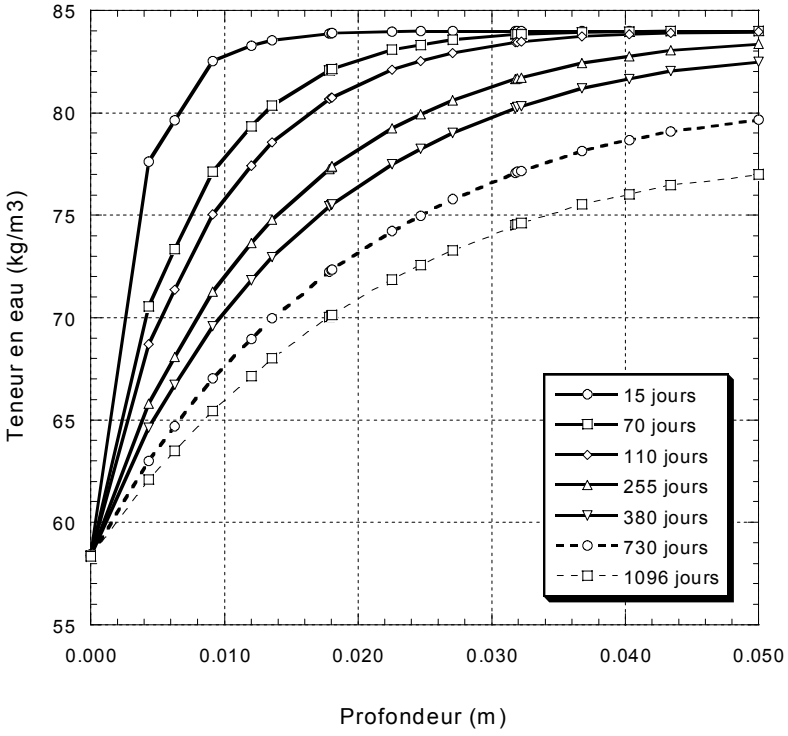
Les figures 10.5a, 10.5b et 10.5c présentent les profils de teneurs en eau au cours du temps obtenus pour l'épaisseur de 50 mm avec les différents matériaux, toujours en considérant impossibles les échanges d'humidité avec le support.

La diffusivité hydrique des trois matériaux, définie par le paramètre A, étant très différente, l'évolution des profils de teneur en eau libre au cours du temps est également très différente d'un matériau à l'autre. Le mortier ordinaire sèche beaucoup plus rapidement que les deux autres matériaux. Après 1096 jours de séchage, la quasi totalité de l'épaisseur de la réparation est à l'équilibre avec l'humidité relative extérieure. L'interface avec le support sera donc rapidement soumise à un séchage important. Le béton ordinaire et le béton hautes performances ont des diffusivités hydriques beaucoup plus faibles. En effet, même après 3 ans (1096d) de séchage, seule la partie supérieure de la réparation est à une teneur en eau nettement plus faible que la teneur en eau initiale. Cela

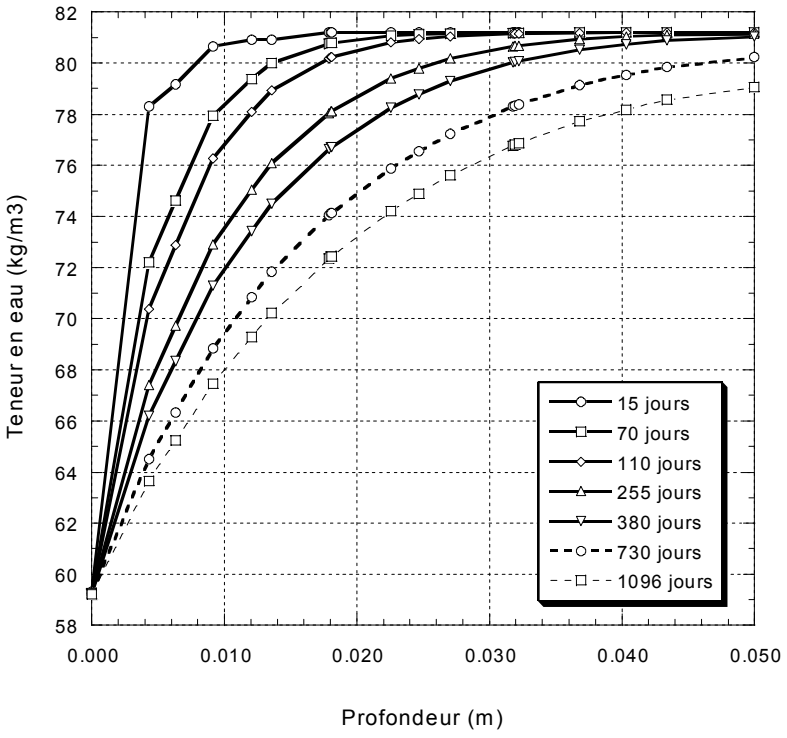
est encore plus significatif pour le béton hautes performances qui ne sèche vraiment que de façon superficielle.



(a)



(b)



(c)

Figure 10.5: Profils de teneur en eau en fonction du temps pour les 3 matériaux pour l'épaisseur de réparation de 50 mm ((a) :MO, (b) :BO, (c) :BHP)

- *Étude du pompage de l'eau de la réparation par le support*

Dans cette partie de l'étude du séchage d'une réparation mince en béton, l'échange d'humidité entre le support et la réparation a été rendu possible. En effet, lorsque le matériau constituant le support est à l'équilibre avec le milieu extérieur, sa teneur en eau libre est inférieure à celle du matériau de réparation. Lors de la mise en place de la réparation, le support va alors « pomper » de l'eau au matériau de réparation créant ainsi un gradient d'humidité au niveau de l'interface.

La figure 10.6 présente l'effet du pompage de l'eau du matériau de réparation par le support sur le profil de teneur en eau libre au sein du système réparation-support.

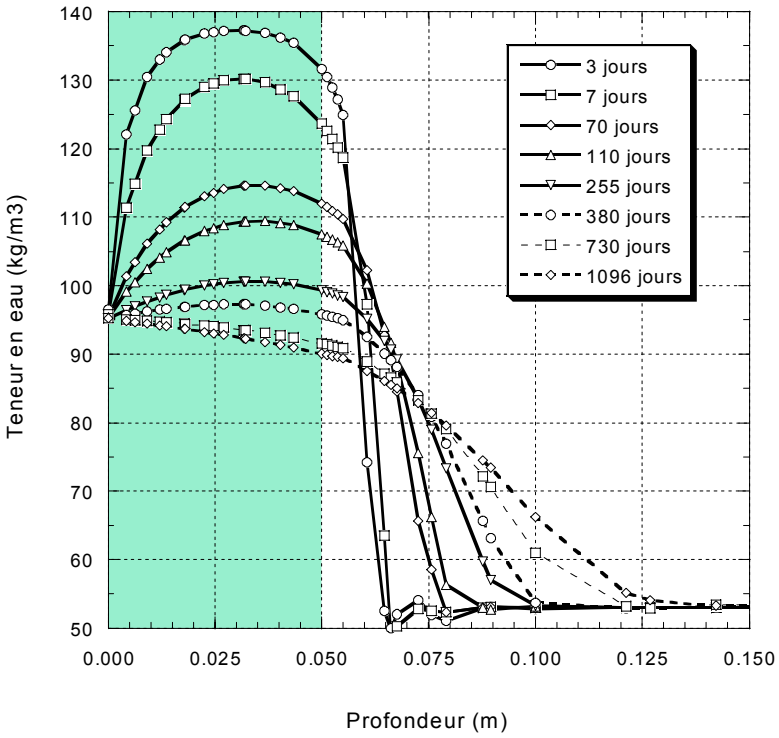


Figure 10.6: Profils de teneur en eau pour la réparation d'épaisseur 50 mm en mortier ordinaire avec échange d'humidité avec le support (zone ombrée: réparation)

Dès les premiers jours suivant le mise en place de la réparation, coïncidant ici au début des échanges avec le milieu extérieur, un gradient de teneur en eau est généré proche de l'interface avec le support. Le séchage est toutefois plus important en surface qu'à l'interface, d'où l'allure non symétrique du profil de teneur en eau. Avec l'avancement du séchage, la teneur en eau du support augmente et l'équilibre des teneurs en eau du support et de la réparation commence à s'établir.

L'effet du pompage sur le profil de teneur en eau de la réparation sera bien sur d'autant plus prononcé que l'épaisseur de la réparation sera faible. L'importance de ce pompage dépendra également de la diffusivité hydrique du matériau de réparation (l'exemple présenté sur la figure 10.5 correspond au cas le plus défavorable puisqu'il s'agit du mortier ordinaire, matériau ayant la diffusivité hydrique la plus grande).

- *Poursuite du séchage dans le support*

Le pompage de l'eau du matériau de réparation par le support n'est pas le seul type d'échange hydrique qui peut avoir lieu entre les deux matériaux en contact. En effet, avec l'avancement du séchage dans le temps, il se peut que le séchage affecte également le support, causant ainsi des déformations de retrait dans cette partie du système, pouvant modifier le comportement mécanique et la fissuration du système. Dans cette partie de l'étude numérique sur le séchage d'un système réparation-support, le séchage du support a été rendu possible. Pour cela, un coefficient de diffusion a été introduit au matériau du support ($A=2.10^{-13}$ m^2/s) et sa teneur en eau initiale a été fixée à la même valeur que celle du matériau de réparation (ceci afin de ne pas générer transport d'eau entre la réparation et le support autre que celui provoqué par le séchage).Les calculs ont été menés avec le mortier ordinaire comme matériau de réparation. Les profils de teneur en eau obtenus au cours du temps sont présentés sur la figure 10.7. Cette figure montre principalement qu'un séchage significatif de l'interface et par suite de la partie supérieure du support n'apparaît qu'après 255 jours.

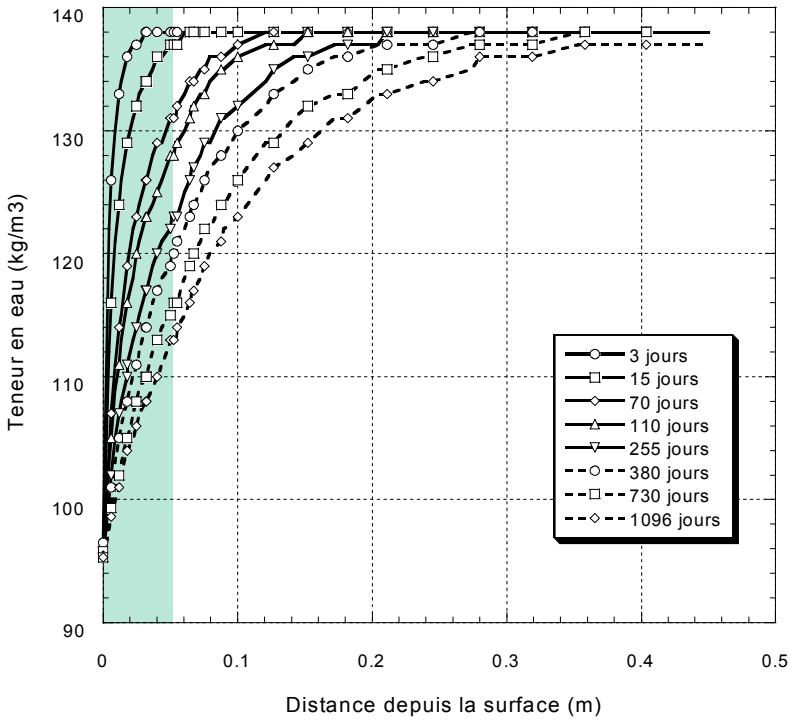


Figure 10.7: Profil de teneur en eau en fonction du temps pour une réparation en mortier ordinaire de 50 mm d'épaisseur avec poursuite du séchage dans le support (zone ombrée: réparation)

10.2 CONTRAINTES ET RISQUES DE FISSURATION DUS AU SECHAGE

10.2.1 Aspects théoriques du calcul mécanique

Le couplage entre le calcul hydrique et le calcul mécanique est un couplage faible. En effet, les calculs réalisés dans le cadre de cette étude font l'hypothèse que les contraintes ou la fissuration n'occasionnent pas de modification des propriétés de transport de l'humidité dans le matériau.

Différentes études ont montrées que la déformation de retrait est proportionnelle au degré de saturation du matériau, donc à sa teneur en eau C (Wittmann, 1993)(Granger, 1995)(Mensi et coll., 1988). Le retrait de dessiccation est donc supposé proportionnel à la perte en poids du matériau. Sous forme incrémentale, la déformation associée au séchage peut donc s'écrire sous la forme suivante:

$$d\varepsilon_{rd} = \kappa_{béton} dC \qquad (9)$$

où :

- $\kappa_{béton}$ est le coefficient de contraction hydrique (par analogie avec le coefficient de dilatation thermique) du béton considéré.
- $d\varepsilon_{rd}$ est l'incrément de déformation de retrait de dessiccation provoquée par la perte en poids dC .

En faisant l'hypothèse d'un comportement élastique, les contraintes sont calculées à partir de la relation suivante :

$$\sigma = E\kappa_{béton}\Delta C \qquad (10)$$

où :

- $\Delta C = (C - C_{ini})$ est la variation de teneur en eau depuis le début du séchage
- E est le module de Young du matériau (MPa)

Afin de prendre en compte le caractère vieillissant du matériau, le module de Young est considéré évolutif. C'est à dire que pour une variation de teneur en eau calculée entre l'instant initial et le temps t, le module d'élasticité utilisé est celui que développe le matériau au temps t. Le calcul n'est donc pas transitoire, mais permet en première approche de prendre en compte le durcissement progressif du matériau qui restreint, tout comme la présence du support, les déformations de retrait. Au jeune âge cela évite de surestimer les contraintes engendrées par le retrait en utilisant un module de Young trop élevé. En revanche, pour les calculs à plus long terme, les contraintes de retrait sont à nouveau surestimées.

10.2.2 Coefficient de dilatation hydrique des matériaux étudiés

Le coefficient de dilatation hydrique $\kappa_{béton}$ est la pente K de la courbe qui relie la déformation de retrait de dessiccation à la perte de masse relative enregistrée à l'humidité relative imposée, divisée par la masse volumique $\rho_{béton}$ du matériau (équation 11).

$$\kappa_{béton} = \frac{K}{\rho_{béton}} \qquad (11)$$

Afin de déterminer ce coefficient, des essais de retrait associés à un suivi de perte de masse ont été réalisés en laboratoire dans une salle à température et humidité contrôlée (T=23oC, H.R.=50%) sur des prismes de 100x100x350 mm pour chacun des trois matériaux de réparation.

La figure 10.8 présente la déformation de retrait de dessiccation en fonction de la perte de masse enregistrée au cours de ces essais pour les 3 matériaux de réparation. La linéarité de la déformation avec la perte de masse est bien observée. Il faut cependant remarquer que, contrairement à ce qui était attendu, 0 µm/m de déformation ne correspond pas toujours à 0% de perte de masse. Ce phénomène peut être attribué, dans le cas d'une éprouvette d'épaisseur importante, à la fissuration de peau qui vient relâcher les contraintes de traction

générées en surface par le gradient d'humidité, ce qui a pour effet de relâcher également les déformations (Granger, 1994).

À partir des pentes des droites de la figure 10.8, le coefficient de contraction hydrique K_b des 3 matériaux de réparation a pu être déterminé. Les résultats sont donnés dans le tableau 10.3. Le mortier ordinaire et le béton ordinaire ont des coefficients de contraction hydrique quasi identiques. En revanche, celui du béton hautes performances est plus élevé. Il faut cependant remarquer qu'avec la modélisation du retrait de dessiccation qui est réalisée ici, de telles variations des coefficients de contraction hydrique sont peu importantes vis à vis des différences de vitesse de diffusion et de quantité d'eau libre accessible au séchage des 3 matériaux.

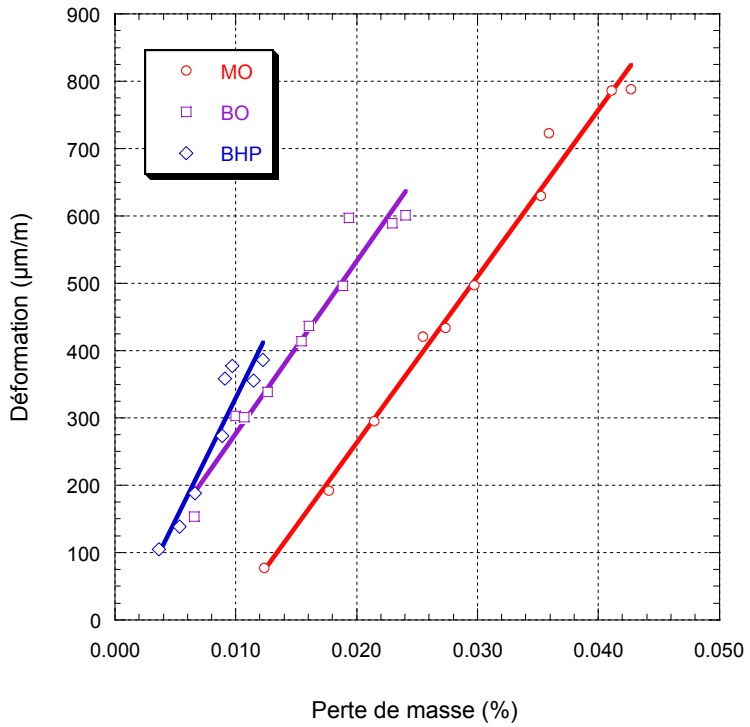


Figure 10.8: Déformation de retrait de dessiccation des matériaux de réparation en fonction de leur perte de masse, à (T=23°C, H.R.=50%)

Tableau 10.3: Coefficients de contraction hydrique des matériaux

	MO	BO	BHP
$K_{béton}\ 10^{-6}/(kg/m^3)$	11,7	11,4	14,8

10.2.3 Maillages, conditions aux limites et simulations effectuées

La structure et le maillage utilisés pour les calculs des contraintes sont identiques à ceux utilisés pour le calcul de diffusion. Les calculs sont effectués en utilisant l'hypothèse des contraintes planes. Les conditions aux limites sont celles d'une poutre sur appui (figure 10.9).

Les problèmes étudiés reprennent ceux abordés dans les calculs de distribution de teneur en eau dans un système réparation-support (cf. 10.1.3). Le profil et le risque de fissuration due au séchage sans échange d'humidité avec le support a d'abord été étudié. Par la suite, le pompage du support a été introduit et son effet sur le profil de contraintes et sur le risque de fissuration a été analysé.

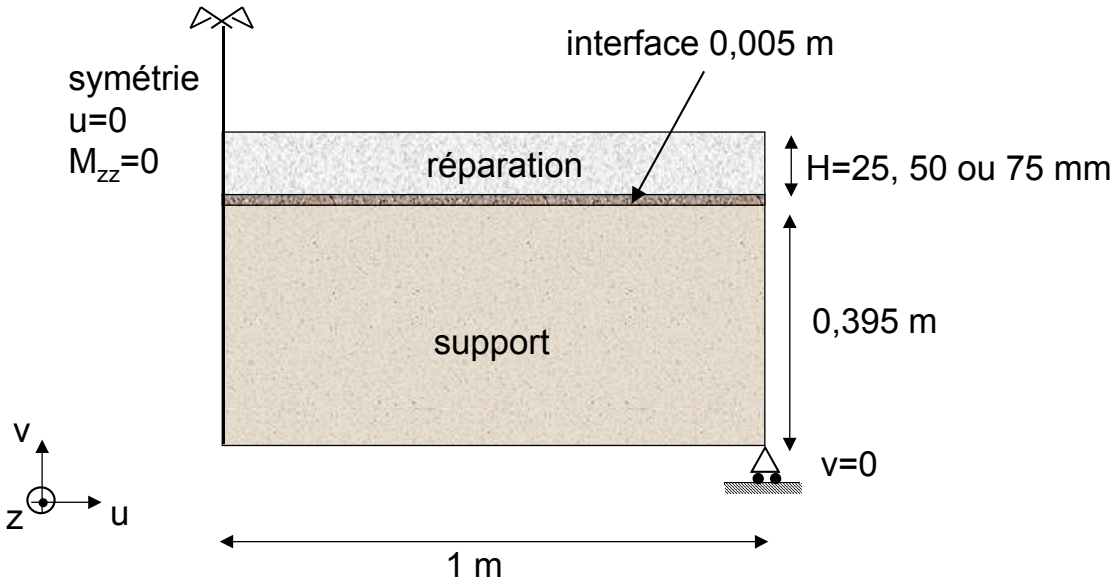


Figure 10.9: Conditions aux limites imposées lors des calculs

10.2.4 Distribution des contraintes dans une réparation soumise au séchage

Pour illustrer le profil de contraintes et les risques de fissuration générés par le séchage dans une structure réparée, le cas de la réparation en mortier ordinaire d'épaisseur 50 mm a été choisi.

- *Sans échange d'humidité avec le support*

La figure 10.10 présente l'évolution au cours du temps des contraintes normales en fonction de la profondeur, suivant une coupe située à une abscisse x=0,5 m depuis l'axe de symétrie.

Les profils de contraintes obtenus indiquent clairement que l'important gradient d'humidité qui est généré dès les premiers jours de séchage est à l'origine de contraintes de traction très importantes en surface de la réparation. Avec l'hypothèse d'un comportement élastique non fissurant, des contraintes de l'ordre de 18 MPa sont obtenues. La fissuration devient donc inévitable. En revanche, au cours des premiers jours, alors que le séchage demeure superficiel, la zone proche de l'interface n'est quasiment pas sollicitée. Comme le montre la figure 10.10 dans le cas où aucun échange d'humidité a lieu au travers de l'interface, le support est toujours sollicité en compression. Au fur et à mesure que le séchage progresse et donc que le gradient d'humidité au sein de la couche de réparation s'estompe, le gradient de contraintes de traction s'estompe également et l'ensemble de la réparation se trouve sollicitée par des contraintes de traction importantes. Cela devrait correspondre à une progression de la profondeur de fissuration due au séchage.

Les simulations effectuées montrent également que les contraintes de cisaillement générées à l'interface sont négligeable par rapport au contraintes normales de traction. Ce résultat peut s'expliquer de la façon suivante. En dehors des zones de bord, l'équilibre des contraintes dans la réparation (équation 12) nécessite l'existence de contraintes de cisaillement à l'interface avec le support. Toutefois, compte tenu du rapport des surfaces tangentielle et normale celles-ci sont négligeables devant les contraintes de traction.

$$\iint \sigma_n . dS_n + \iint \tau . dS_t = 0 \qquad (12)$$

avec:

- σ_n la contrainte normale
- τ la contrainte de cisaillement
- S_n et S_t les surfaces normale et tangentielle

- *Avec échanges d'humidité avec le support*

Si maintenant les échanges d'humidité avec le support sont rendus possibles, c'est à dire que le support peut pomper de l'eau au matériau de réparation ou bien que la poursuite du séchage dans le support est possible, alors le profil de contraintes peut être modifié.

Les résultats avec pompage du support sont présentés sur la figure 10.11. Ils montrent clairement que le pompage de l'eau de la réparation par le support engendre des contraintes de traction supplémentaires dans la zone au dessus de l'interface. Au cours des premières semaines de séchage, alors que le gradient de contraintes est important et que l'essentiel des contraintes se concentrent en surface de la réparation, le seul effet du pompage du support créé des contraintes de traction suffisantes pour amener la fissuration dans la zone proche de l'interface.

La figure 10.12 montre un exemple de profil de contraintes obtenus à différents temps de calcul lorsque le séchage se poursuit dans le support. Les profils de contraintes obtenus avec séchage du support ne sont pas radicalement différents

de ceux obtenus sans séchage du support. En effet, après 3 jours de séchage un gradient de teneur en eau s'est installé et génère des contraintes de traction en surface de la réparation et de compression dans la partie supérieure du support. Afin d'assurer l'équilibre de la section, des contraintes de traction apparaissent dans la partie inférieure du support. Avec l'avancement du séchage, l'interface et la partie supérieure du support sont soumises à des déformations de retrait. Celles-ci ne sont cependant pas suffisantes pour que le support soit sollicité en traction dans sa partie supérieure en contact avec l'interface car des contraintes de compression y sont toujours observées même après 1096 jours de séchage. En fait, ce que montrent les deux profils de contraintes présentés sur la figure 10.12, c'est que plus le retrait est important dans la couche de réparation et plus les contraintes de traction y sont importantes. En contrepartie, plus la réaction du support pour empêcher le retrait de la réparation est important et plus celui-ci est sollicité en compression dans sa partie supérieure. La poursuite du séchage dans le support engendre certes des déformations de retrait, mais celles-ci ne sont pas suffisantes pour compenser totalement les contraintes de compression. Il faut cependant remarquer la forme non linéaire du profil de contraintes dans la partie supérieure du support qui est en fait le reflet de cette compensation des contraintes de compression par le retrait du support. Ainsi, dans les conditions simulées et pour les hypothèses formulées, même après 3 ans de séchage et des pertes en eau significatives dans le support, aucune contrainte de traction n'y est générée dans sa partie supérieure.

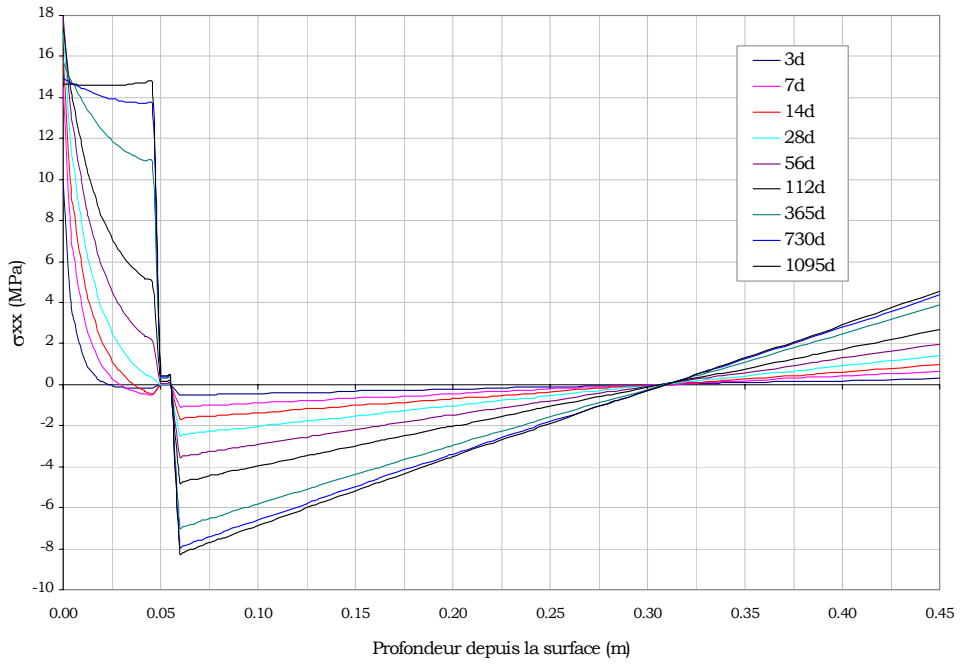


Figure 10.10: Profils de contraintes dues au séchage dans la réparation en mortier ordinaire d'épaisseur h=50 mm, sans échange avec le support

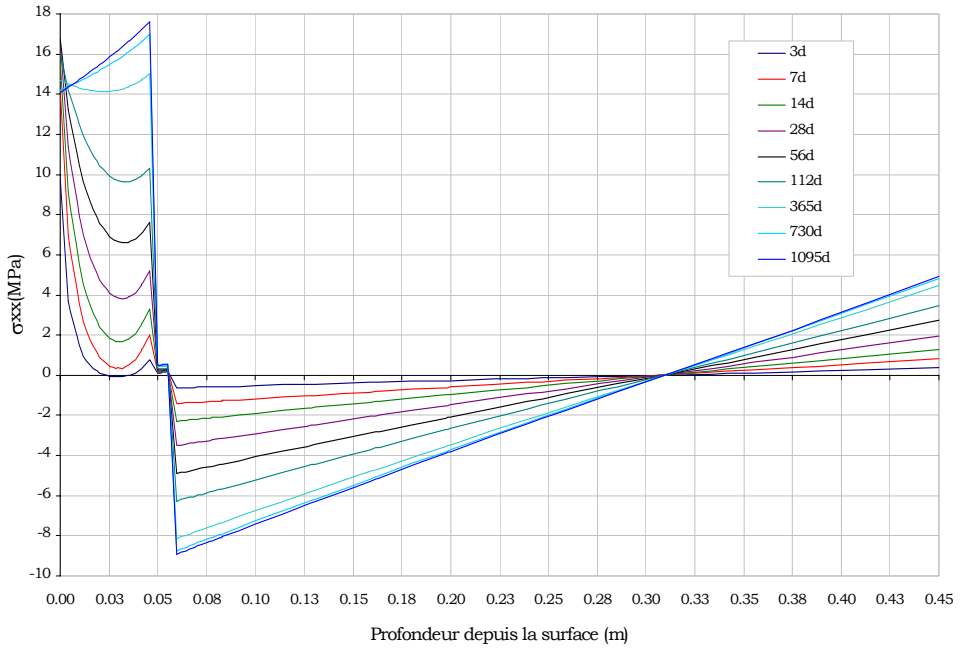


Figure 10.11: Profils de contraintes dues au séchage dans la réparation en mortier ordinaire d'épaisseur h=50 mm, avec pompage du support

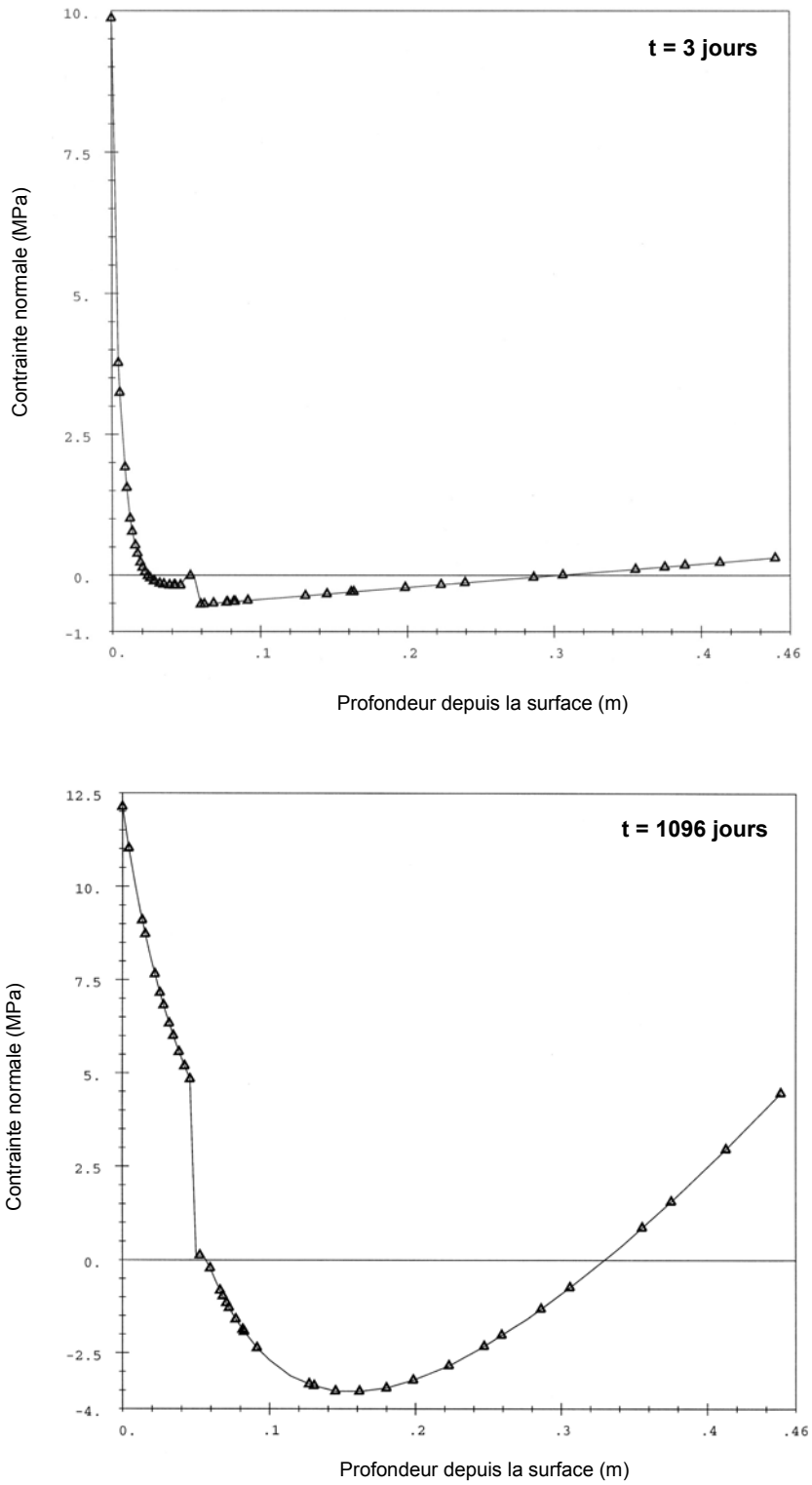


Figure 10.12: Profils de contraintes dues au séchage dans la réparation en mortier ordinaire d'épaisseur h=50 mm, avec support séchant, après 3 jours et après 1096 jours

10.2.5 Risque de fissuration due au séchage dans une réparation mince

Afin d'évaluer le risque de fissuration, les contraintes dues au retrait de séchage empêché ont été comparées à la résistance en traction du matériau. Les figures 10.13 et 10.14 montrent l'évolution des contraintes normales σ_{xx} en fonction du temps pour différents nœuds du maillage situés dans la couche de réparation, dans les deux cas étudiés sans et avec pompage du support. Les calculs présentés ici ont été réalisés sur une réparation en mortier ordinaire de 50 mm d'épaisseur. Sur ces graphiques, la courbe représentant la résistance en traction correspond à un lissage des résultats expérimentaux obtenus à partir d'essais de traction par fendage (cf. Partie II/ Chapitre 5).

Les résultats montrent que le risque de fissuration est très important. Pour le cas sans pompage présenté sur la figure 10.13, les contraintes de traction générés par le retrait empêché atteignent la limite élastique du matériau en partie supérieure de la réparation après environ 10 jours. Avec l'avancement du séchage, après environ 100 jours, l'ensemble de la réparation est soumis à des contraintes de traction dépassant la limite élastique du matériau.

Dans le cas où les échanges hydriques avec le support sont pris en compte (figure 10.14), la limite élastique du matériau est atteinte beaucoup plus rapidement dans la zone proche de l'interface. Alors que cela prenait environ 100 jours pour que le nœud placé à une profondeur de h=38,6 mm depuis la surface soit soumis à des contraintes dépassant la limite élastique, avec le pompage par le support la limite est atteinte dès 35 jours environ. De la même façon, la limite élastique est atteinte plus rapidement pour un nœud situé juste au dessus de l'interface (h=46 mm) que pour un nœud situé au cœur de la réparation (h=21,7 mm).

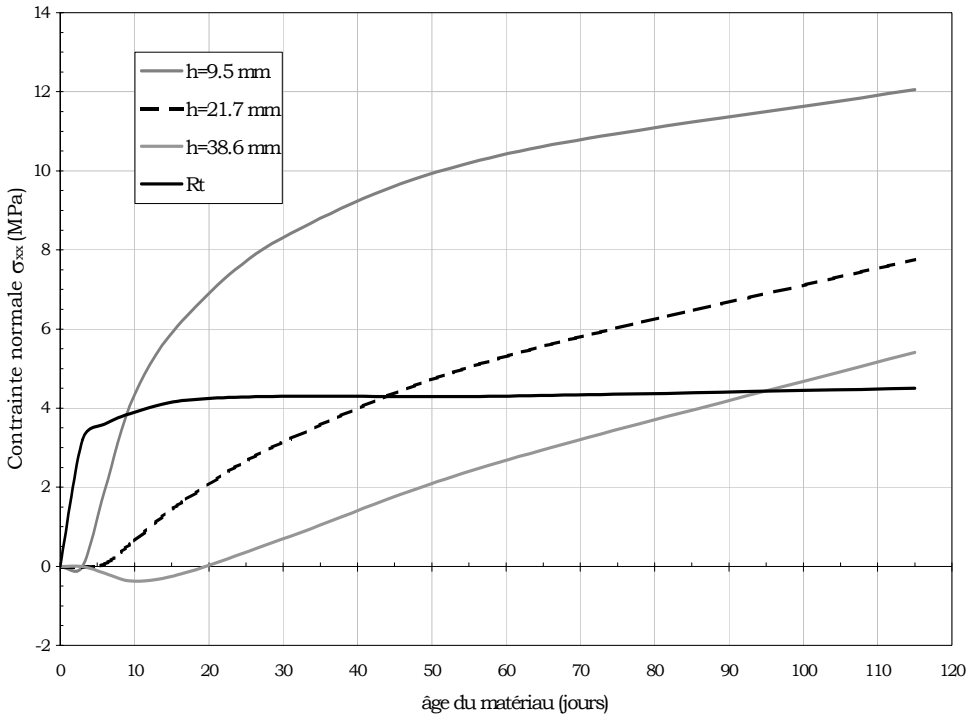


Figure 10.13: Risque de fissuration du au séchage, sans effet du pompage du support, pour la réparation d'épaisseur 50 mm en mortier ordinaire (h: profondeur depuis la surface)

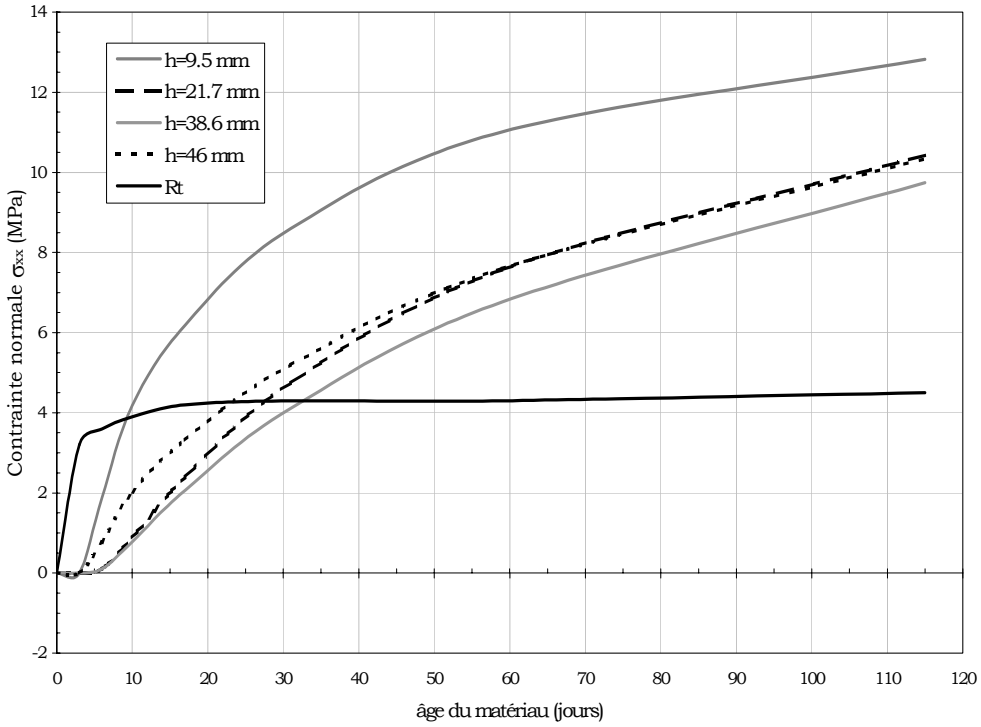


Figure 10.14: Risque de fissuration du au séchage, avec effet du pompage du support, pour la réparation d'épaisseur 50 mm en mortier ordinaire (h: profondeur depuis la surface)

10.3 CONCLUSION

Ces calculs ne prennent pas en compte la capacité d'adaptation par fluage du matériau. Ils sont également basés sur un comportement de matériau élastique parfait. L'objectif de cette modélisation simplifiée n'était cependant pas de calculer avec précision les contraintes générées par le séchage ni de prédire avec exactitude la fissuration, mais plutôt de comprendre le fonctionnement mécanique d'un élément formé de deux bétons aux propriétés différentes et d'estimer l'ordre de grandeur des contraintes générées dans un tel système ainsi que le risque de fissuration qui leur est associé.

Dans le cas du retrait de séchage empêché, les calculs ont montré que les gradients de teneur en eau qui sont générés par le séchage différentiel induisent des contraintes de traction particulièrement importantes qui rendent inévitable la fissuration en surface de la réparation. Reste alors à savoir comment cette fissuration de peau va se propager dans la couche de réparation. Même si le séchage par diffusion est un phénomène extrêmement lent, les calculs montrent que des contraintes de traction importantes sont générées rapidement en profondeur dans la réparation ce qui laisse présumer une propagation rapide des fissures de retrait dans la réparation. Il est possible que le comportement viscoélastique du matériau permette de ralentir cette propagation et ainsi d'en assurer un certain contrôle. Nous ne savons toutefois pas dans quelle mesure ce phénomène pourrait avoir lieu sachant que la relaxation par fluage est couplée à une relaxation des contraintes par fissuration.

Un autre point important qui émerge de cette étude est l'effet des échanges hydriques entre le support et le matériau de réparation. Un support à l'équilibre avec l'humidité relative extérieure contient moins d'eau libre que le matériau de réparation lorsque celui-ci est mis en place. Comme il a été montré, cela conduit alors à un pompage de l'eau de la réparation par le support qui engendre un gradient d'humidité important proche de l'interface. Dans cette zone de pompage, des contraintes de traction supplémentaires sont alors générées, créant ainsi un risque de fissuration supplémentaire.

CHAPITRE 11

MODÉLISATION NUMÉRIQUE DE LA FISSURATION DUE AU SÉCHAGE DANS UNE RÉPARATION MINCE EN BÉTON

Ce chapitre présente les résultats d'une étude numérique sur la fissuration due au retrait de séchage empêché et ses mécanismes de propagation dans une réparation mince en béton. Les simulations effectuées mettent en œuvre le modèle de fissuration probabiliste RPDC développé par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (Rossi et coll., 1992) au sein du code de calcul par éléments finis CESAR-LCPC. Les calculs effectués ont pour point de départ les résultats de l'étude du séchage dans une réparation mince en béton présentés au Chapitre 10. Les calculs ont consisté à coupler les calculs de diffusion à un calcul mécanique avec critères de fissuration. Les aspects théoriques du modèle de fissuration probabiliste sont tout d'abord présentés. Ensuite, la méthode choisie pour modéliser l'interface entre la réparation et le support et sa validation sont exposées. Enfin, des résultats de fissuration obtenus sous différentes conditions, suivant différentes épaisseurs de réparation et avec différents matériaux sont présentés.

11.1 ASPECTS THEORIQUES DU MODELE DE FISSURATION PROBABILISTE

11.1.1 Concepts de bases et hypothèses du modèle

Le béton est un matériau composite fortement hétérogène constitué non seulement d'une matrice cimentaire dans laquelle se trouve des granulats de tailles différentes, mais aussi de vides, que ce soit des bulles d'air ou des défauts. Les caractéristiques mécaniques du béton, que ce soit la résistance en compression, en traction ou même le module élastique, varient non seulement de façon aléatoire au sein du matériau, mais elles sont de plus dépendantes de l'échelle de la structure.

Le modèle de fissuration probabiliste prend en compte ces deux aspects, hétérogénéité et effet d'échelle, dans sa modélisation du comportement mécanique du béton.

Le modèle de fissuration probabiliste se fixe donc deux objectifs :

- prendre en compte de manière explicite l'hétérogénéité du béton
- décrire les fissures comme des discontinuités cinématiques

Une distribution aléatoire du module de Young et des résistances est effectuée sur les différents éléments du maillage de façon à traduire l'hétérogénéité du matériau. Cette hétérogénéité des propriétés mécaniques du béton engendre une fissuration qui se traduit par la création de plans de rupture locaux qui apparaissent de manière aléatoire au sein du matériau lorsque l'un des critères de fissuration est atteint. Ces plans de rupture sont modélisés par des éléments spéciaux de contact, d'épaisseur virtuelle non nulle, qui interfacent les éléments de volume et sur lesquels est réalisée une distribution aléatoire de la résistance en traction et du module d'élasticité (Figure 11.1).

Le modèle de fissuration probabiliste est basé sur les hypothèses suivantes (Wu, 1991)(Rossi et coll., 1992):

- La modélisation doit fournir des informations concernant la fissuration d'une structure donnée, à une échelle qui reste petite vis à vis des gradients macroscopiques de contraintes existant au sein de cette structure.
- Il existe une correspondance directe entre le volume d'un élément du maillage et celui du matériau réel.
- Le comportement local du béton est considérer isotrope et élastique fragile parfait, avec un coefficient de Poisson constant dans les éléments de massif.
- Les fonctions de distribution des caractéristiques mécaniques du béton ainsi que celle du critère local d'initiation des fissures dépendent de la taille des éléments du maillage.

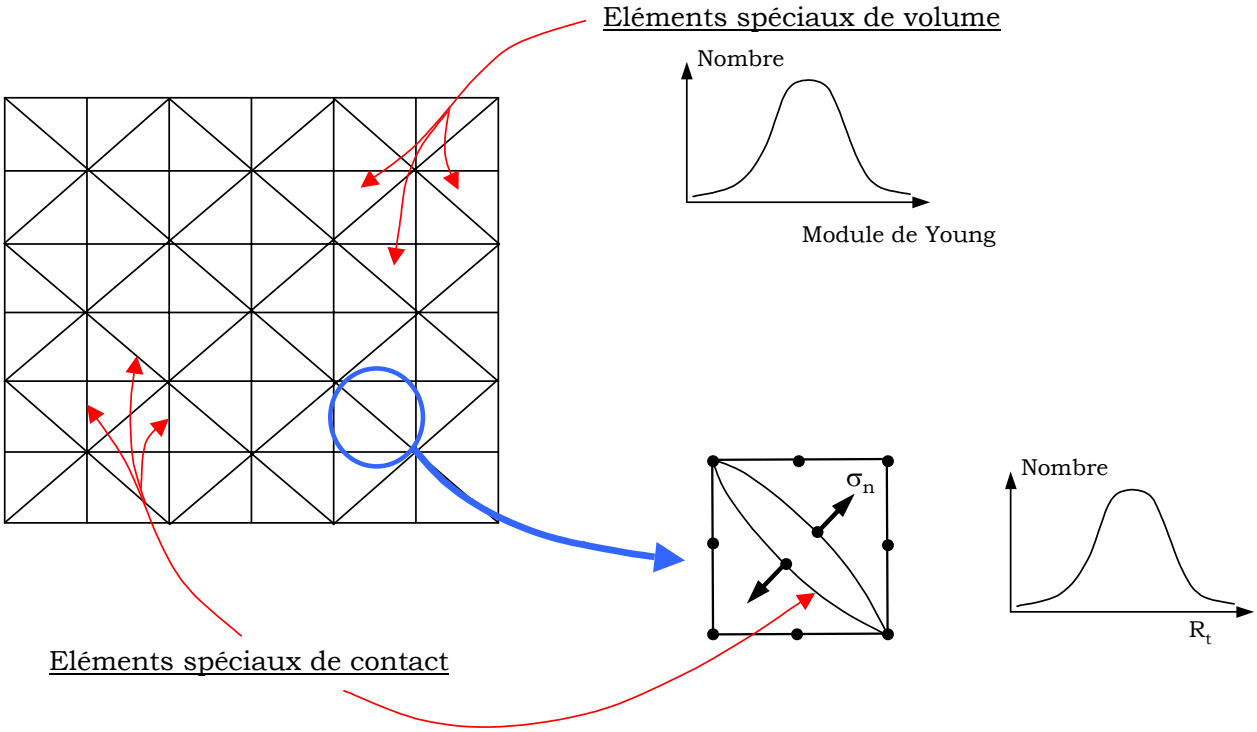


Figure 11.1: Modélisation d'une structure à l'aide du modèle de fissuration probabiliste RPDC

11.1.2 Critères de fissuration

Deux critères d'initiation de fissure sont utilisés dans le modèle probabiliste de fissuration (figure 11.2): un critère en traction (1) et un critère en cisaillement (2). Ils sont définis par les équations de fonction de charge suivantes :

$$\sigma_n - R_t \leq 0 \quad (1)$$

$$|\tau| - \gamma R_t \leq 0 \quad (2)$$

où :

- σ_n est la contrainte normale au centre de l'élément de contact
- R_t est la résistance en traction locale distribuée aléatoirement
- τ est la contrainte tangentielle dans l'élément de contact
- $\gamma = c/R_t$ est un paramètre exprimant la relation entre résistance en traction et cohésion

Le paramètre γ est supposé constant et indépendant des effets d'échelle (Rossi et coll., 1996). La distribution aléatoire de la cohésion suit ainsi celle de la résistance en traction. Des simulations numériques du comportement du béton en compression, comparées à des résultats expérimentaux, ont permis de fixer ce paramètre à une valeur de 5 (Rossi et coll., 1996). Une valeur différente sera introduite pour la modélisation de l'interface entre le support et la couche de réparation.

Lorsque l'un de ces deux critères de rupture est atteint dans un élément de contact, il y a ouverture de l'élément de contact et ainsi création d'une fissure sous forme d'une discontinuité cinématique. À chaque création de fissure et évolution de celle-ci, correspond une modification de l'état « actif-inactif » des éléments de contact et donc une modification de la matrice de rigidité globale du système étudié.

Une fois qu'un élément de contact est ouvert, la résistance à la traction de cet élément devient égale à 0 durant tout le reste du calcul. La fissure peut donc

ainsi se refermer puis se rouvrir afin de satisfaire aux conditions d'équilibre sur la structure sans dissipation d'énergie supplémentaire. Le modèle gère le frottement possible entre les deux lèvres de la fissure par un critère du type Mohr-Coulomb (figure 11.3) défini par la relation suivante :

$$|\tau| - \sigma_n \tan\varphi \leq 0 \qquad (3)$$

où :

- φ est l'angle de frottement du béton (pris égal à 45°)

Remarquons enfin qu'un critère géométrique de non-interpénétration a également été introduit dans le but d'interdire à tout point d'un élément de pénétrer à l'intérieur d'un autre élément que nous soyons dans un état actif non fissuré ou dans un état inactif fissuré de l'élément.

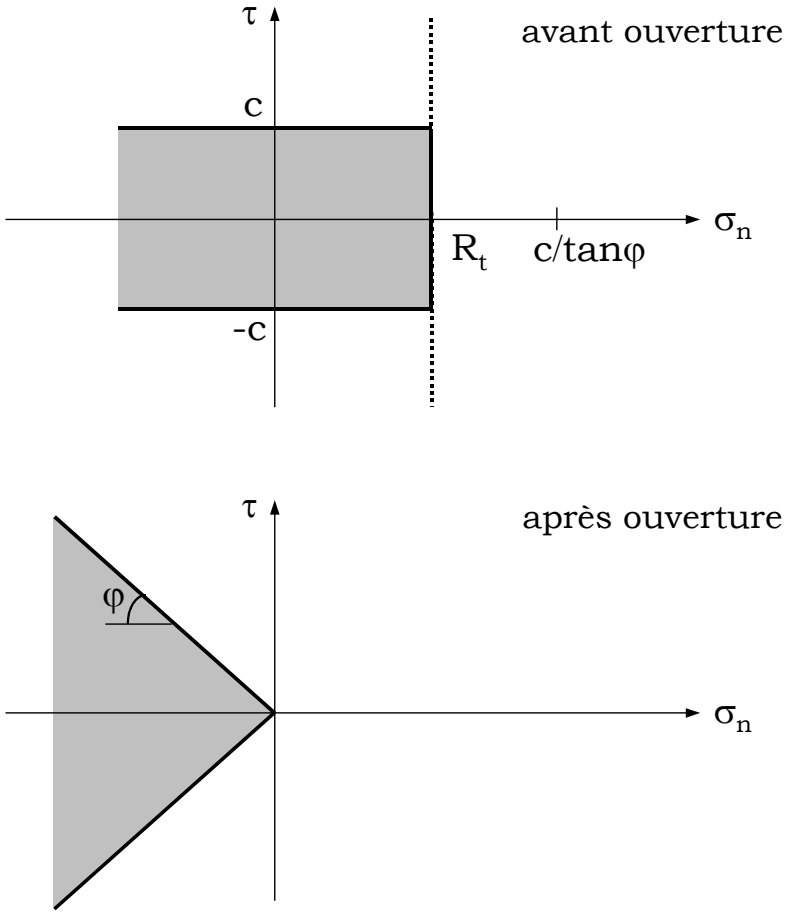


Figure 11.2: Critère de fissuration avant et après ouverture de fissure

11.1.3 Prise en compte des effets d'échelle et de l'hétérogénéité du béton

Comme il l'a été mentionné précédemment, les propriétés mécaniques du matériau sont considérées variables au sein de la structure afin de reproduire le caractère hétérogène du béton et aussi leur dépendance vis à vis des effets d'échelle. Des fonctions de distribution statistiques ont donc été introduites dont les expressions analytiques ont été déterminées suite à d'importantes séries d'essais. Les deux facteurs principaux qui déterminent l'hétérogénéité et les effets d'échelle sont respectivement le rapport *volume de béton/volume du plus gros grain* et la *compacité* du béton. La compacité du béton est prise en compte par la résistance en compression qui reflète la qualité de la matrice cimentaire selon la présence des défauts dans le matériau.

Les fonctions de distribution sont indépendantes du type de béton. Elles sont données par les relations suivantes :

- Pour la résistance en traction :

$$m(f_t) = 6{,}5\left(\frac{V_T}{V_g}\right)^{-b} \qquad (4)$$

$$\frac{\sigma(f_t)}{m(f_t)} = 0{,}35\left(\frac{V_T}{V_g}\right)^{-B} \qquad (5)$$

avec :

$$b = 0{,}25 - 3{,}6.10^{-3} f_c + 1{,}3.10^{-5} f_c^2 \qquad (6)$$

$$B = 4{,}5.10^{-2} + 4{,}5.10^{-3} f_c - 1{,}8.10^{-5} f_c^2 \qquad (7)$$

- Pour la le module de Young :

$$m(E) = E_{apparent} \qquad (8)$$

$$\frac{\sigma(E)}{m(E)} = 0{,}15\left(\frac{V_T}{V_g}\right)^{-d} \qquad (9)$$

avec :

$$d = 0{,}116 + 2{,}7.10^{-3} f_c - 3{,}4.10^{-6} f_c^2 \qquad (10)$$

où :

- m est la valeur moyenne
- σ/m est le coefficient de variation
- V_T est le volume de l'éprouvette de béton
- V_g est le volume du plus gros granulat du béton
- f_c est la résistance en compression déterminée à partir de l'essai normalisé
- f_t est la résistance en traction
- $E_{apparent}$ est le module d'élasticité moyen déterminé expérimentalement*.

11.1.4 Paramètres de sortie du modèle de fissuration probabiliste

Le modèle de fissuration probabiliste permet d'accéder, pour chaque pas de temps du calcul, au schéma de fissuration de la structure étudiée. Sur ce schéma, toutes les fissures, c'est à dire tous les éléments de contact ayant subis un dépassement de critère, apparaissent quelle que soit leur ouverture. Le modèle permet aussi l'accès aux ouvertures des fissures de notre choix et notamment à l'ouverture de fissure maximale.

Afin de pouvoir comparer les résultats issus des calculs avec ceux issus des mesures expérimentales, les calculs ont été traités de façon à déterminer les mêmes paramètres de fissuration que ceux déterminés à partir des mesures, à savoir l'ouverture moyenne et maximale de fissure ainsi que l'espacement moyen entre fissures.

---

* Il semble en effet que la valeur moyenne du module de Young soit indépendante du volume de l'éprouvette sollicitée.

Lors des mesures expérimentales, toutes les fissures n'étant pas mesurables et surtout visibles avec l'instrument dont nous disposions, seules les fissures dont l'ouverture était supérieure à 10µm ont été prises en compte. Les résultats issus des calculs doivent donc être « filtrés» avant d'être comparés aux mesures pour prendre en compte uniquement les fissures dont l'ouverture est accessible à la mesure.

Lors des calculs, pour les premiers pas de temps, les fissures sont peu ouvertes et peu profondes. Il devient donc parfois difficile de savoir quelles fissures éliminer pour accéder à l'ouverture moyenne et à l'espacement moyen. De plus, entre deux pas de temps, étant donné la répartition aléatoire des propriétés mécaniques du matériau au sein des éléments, une fissure qui a été comptabilisée pour le calcul de l'espacement moyen, peut ne plus l'être au pas suivant considéré si finalement une autre fissure, initialement moins ouverture ou moins profonde, s'est d'avantage propagée.

11.2 MODELISATION DE L'INTERFACE ENTRE LE SUPPORT ET LA REPARATION

La modélisation de l'interface entre le support et la couche de réparation a été l'une des principales difficultés rencontrées pour la modélisation du comportement mécanique du système réparation-support.

11.2.1 Notion d'interface

Une interface est une zone de propriétés mécaniques spécifiques issue du contact entre deux solides. Comme il l'est montré dans l'étude bibliographique, une interface entre deux matériaux cimentaires met en jeu différentes forces physico-chimiques et des effets de paroi qui font d'une interface une zone de nature et de propriétés mécaniques différentes des 2 matériaux en contact. Une interface n'est donc pas un matériau au sens physique du terme puisqu'il est difficile de lui attribuer des dimensions géométriques, mais elle n'en demeure pas moins une zone de comportement mécanique différent. Il est donc nécessaire dans une modélisation d'un système réparation-support de prendre en compte la présence de cette interface. Or une interface n'a de sens qu'à une échelle très petite par rapport à l'échelle macroscopique considérée dans les calculs effectués sur la structure composite simulée. Sa prise en compte sur le comportement mécanique global d'une structure restera donc toujours une difficulté importante qui ne peut être levée que par une approche simplifiée reposant sur certaines hypothèses et basée sur certains compromis.

11.2.2 Modélisation de l'interface

- Approche classique avec éléments de contact

En règle générale, une interface est modélisée par des éléments de contact d'épaisseur quasi nulle introduits entre les deux solides en contact. Une rigidité infinie leur est attribuée ainsi qu'une résistance à la traction et/ou au

cisaillement. Dans le progiciel CESAR-LCPC, la modélisation d'une interface est réalisée en utilisant le module TACT qui sert à modéliser le contact entre 2 solides avec adhésion ou non. Toutefois ce module ne gère pas de façon adéquate la fissuration et surtout sa propagation. En effet, en élasticité, une concentration de contrainte infinie existe en pointe de fissure. Celle-ci provoque une ouverture brutale de toute la ligne d'interface dans le système réparation-support dès l'initiation d'une fissure. Après des essais infructueux avec ce type d'approche, cette méthode classique de modélisation de l'interface a été abandonnée.

Il n'était pas non plus envisageable d'utiliser des éléments de contact probabilistes développés spécifiquement pour gérer la propagation de fissure dans une structure. En effet ces éléments, uniquement disponibles dans le module PROB, sont toujours associés à des éléments de volume représentant un matériau avec un module élastique et une résistance en compression. Il n'est actuellement pas envisageable de les utiliser pour modéliser une interface entre deux groupes d'éléments de volume, c'est à dire entre deux matériaux.

- Approche adoptée dans cette étude

Une approche différente de celle traditionnellement utilisée par l'emploi d'éléments de contact a donc été mise en œuvre. Cette méthode consiste à considérer l'interface comme un matériau fictif. Des propriétés mécaniques (résistance en traction, module de Young) lui sont donc attribuées, de même qu'une épaisseur (Figure 11.3). S'agissant d'un matériau fictif, cette épaisseur n'a aucun sens physique. Elle sera choisie très petite devant l'épaisseur de la couche de réparation. En fait, il s'agit de trouver pour cette zone d'interface, le couple (épaisseur, rigidité) qui permette de reproduire le plus adéquatement possible le comportement du système bicouche réparation-support en terme de déformations empêchées et de restriction apportée à celles-ci.

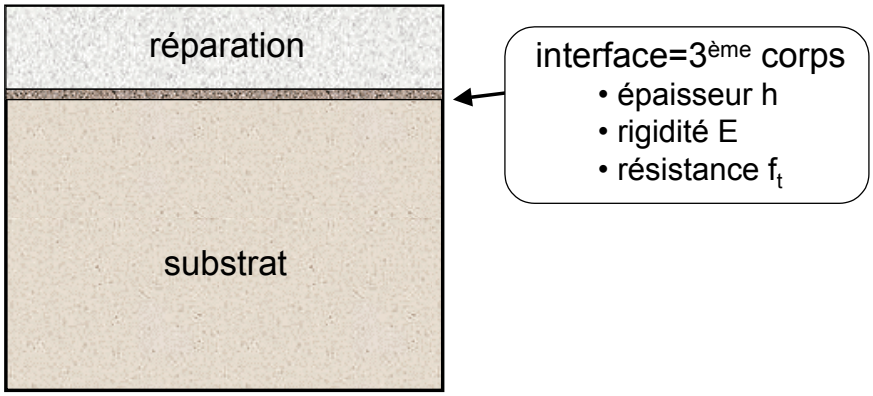


Figure 11.3: Modélisation de l'interface comme un troisième corps d'épaisseur très petite devant la couche de recouvrement

- Caractéristiques géométriques et mécaniques

Une épaisseur de 0,005 m a été choisie pour le « matériau» de l'interface. Quasiment aucune donnée n'a été trouvée dans la littérature scientifique sur le sujet en ce qui concerne les propriétés mécaniques du matériau d'interface et surtout sa rigidité normale ou tangentielle. La modélisation d'une interface entre deux solides étant validée en élasticité par les approches classiques consistant à utilisée des éléments de contact, un calage numérique était donc possible en comparant les réponses obtenues en utilisant ce type de modélisation et celle que nous avons adoptée.

Pour cela, nous avons réalisé un premier calcul élastique en utilisant le module TACT mettant en œuvre une modélisation de l'interface avec des éléments de contact traditionnels. Puis un second calcul a été réalisé, mettant en œuvre l'approche modélisant l'interface comme un troisième matériau et donc ayant une épaisseur. La valeur du module d'élasticité E a été calée de façon à reproduire la courbe effort-déplacement obtenue lors du premier calcul effectué avec les éléments de contact. Au cours des calculs, la résistance en traction utilisée pour l'interface est infinie alors que la cohésion est finie et prise égale à la valeur moyenne (associée à son coefficient de variation) d'adhérence déterminée expérimentalement en laboratoire par des essais de traction directe.

Les calculs réalisés pour caler les paramètres du matériau modélisant de façon fictive l'interface ont été conduits en prenant comme matériau de réparation le

mortier ordinaire et une épaisseur de recouvrement de 50 mm. L'hypothèse que la rigidité de l'interface varie peu d'un matériau de réparation à un autre, dans la mesure où leur nature (nature du liant, rapport eau/ciment, ...) diffère peu, a par la suite été appliquée. La rigidité obtenue lors de ce calage numérique a donc ensuite été considérée constante quel que soit le matériau de réparation. Le seul paramètre qui est ajusté pour tenir compte de la nature différente du matériau de réparation utilisé est la résistance en traction.

Lors du calage numérique de la rigidité de l'interface nous avons fait varier sa valeur entre 1 et 30 GPa. Les caractéristiques de l'interface modélisée sont résumées au Tableau 11.1.

Tableau 11.1: Caractéristiques de l'interface

Epaisseur h (m)	0,005
Rigidité moyenne E (GPa)	1-30
Résistance moyenne à la traction f_t (MPa)	∞
Cohésion C (MPa)	1,6

Les calculs ont été menés sur une demi-poutre réparée de longueur 1 m reproduisant les éléments exposés dans le cadre de l'étude in situ (figure 11.4). Les conditions aux limites et le chargement reproduisent l'essai de cisaillement mis au point à l'université Laval pour caractériser l'adhérence d'un matériau de réparation à son support (Saucier, 1990), essai inspiré de la boite de Cassagrande. Le chargement appliqué est un effort de cisaillement évoluant entre 0 à 10 kN par saut de 1 kN, ce qui représente l'action d'une masse de 100 kg à 1000 kg. Aucun effort normal n'a été appliqué. Comme le montre la figure 11.4, la partie de la poutre correspondant au support est encastrée. Dans le cas des simulations effectuées avec le module TACT, utilisant les éléments de contact pour modéliser l'interface, l'interface de 0,005 m est remplacée par une couche d'élément de contact d'épaisseur quasi nulle.

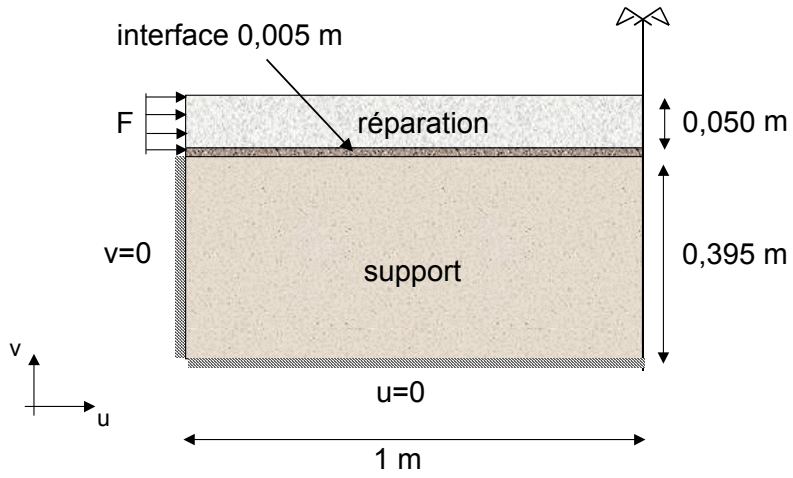


Figure 11.4: Structure et conditions aux limites utilisées lors de la détermination de la rigidité du matériau d'interface

Les propriétés mécaniques des matériaux de réparation et du support sont données dans le tableau 11.2. Les deux dernières colonnes (résistance en traction et angle de frottement) ne concernent que les calculs avec les éléments de contact.

Tableau 11.2: Résumé des caractéristiques mécaniques des matériaux utilisées au cours des simulations pour la détermination de la rigidité de l'interface

MATERIAUX	MODULE D'ÉLASTICITÉ (GPa)	COÉFFICIENT DE POISSON ν	COHÉSION (MPa)	ANGLE DE FROTTEMENT
Réparation	30	0,2	-	-
Interface	1-30	0,2	1,6	45°
Support	50	0,2	-	-

11.2.3 <u>Résultats</u>

Les résultats obtenus montrent qu'une modélisation de l'interface par un 3ème corps requiert une rigidité nettement plus faible que celle du matériau de réparation pour retrouver de façon satisfaisante la courbe effort déplacement obtenue avec une modélisation avec des éléments de contact classiques (Figure 11.5). Une valeur de 1 à 2 GPa semble donner de bons résultats. La valeur choisie pour la suite des calculs sera de 1 GPa. Cette rigidité n'a aucun sens

physique. Il ne s'agit que d'une rigidité donnée au corps d'interface pour reproduire de façon adéquate la restriction apportée par le support aux déformations de retrait du matériau de réparation.

La figure 11.6 montre la déformée obtenue lorsque la charge de cisaillement appliquée vaut 10 kN pour le calcul réalisé avec les éléments de contact comme interface. Cela montre que le choix du chargement variant de 0 à 10 kN s'est avéré adéquat dans la mesure où des déformations provoquant un début de décollement par cisaillement ont été observées.

Le choix de cette rigidité faible comparativement au module élastique typique développé par les bétons classiques pourrait englober certains phénomènes physico-chimiques tels que les phénomènes viscoélastiques qui non pas été pris en compte dans cette étude numérique. Il faut toutefois remarquer qu'il s'agit d'une modélisation simplifiée d'une interface qui n'existe qu'à l'échelle microscopique du matériau et qui ne se veut qu'un compromis numérique à un problème que l'on ne sait pas résoudre « proprement» actuellement. De plus, comme il sera possible de s'en rendre compte dans les sections suivantes présentant des résultats de fissuration obtenus, cette approche est tout à fait satisfaisante pour reproduire le degré de restriction apporté par le support aux déformations de retrait du matériau de réparation. Le comportement mécanique de la structure composite qu'est un élément réparé est donc bien reproduit en terme de fonctionnement par ce type d'approche, malgré son absence de sens physique.

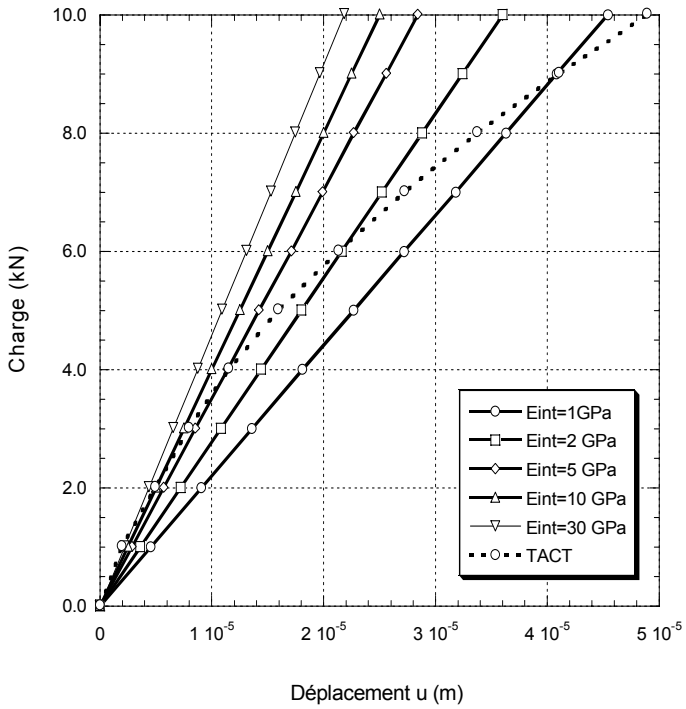


Figure 11.5: Comparaison de la réponse du système en cisaillement, obtenue avec le module TACT (éléments de contact classiques) et avec une modélisation de l'interface par un troisième corps de module variable

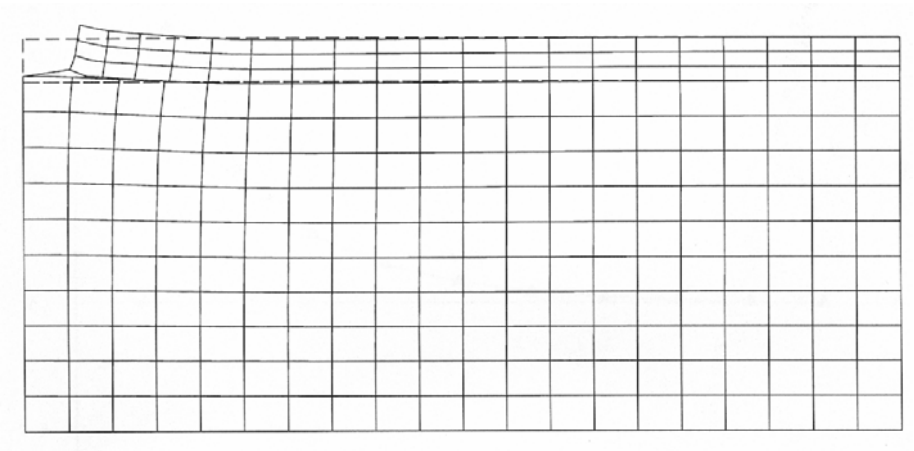


Figure 11.6: Déformée obtenue pour une charge de cisaillement de 10 kN avec le module TACT (éléments de contact classiques)

11.3 DETERMINATION DE LA COHESION DU MATERIAU D'INTERFACE

La cohésion c d'un matériau représente, dans le modèle de fissuration probabiliste, la résistance en cisaillement du matériau. Elle apparaît sous la forme du rapport C/R_t introduit comme un paramètre du matériau dans les données d'entrée des calculs. Pour un matériau cimentaire homogène ce rapport vaut 5 quelle que soit la nature du matériau (cf. 11.1.2). Toutefois, la valeur de ce rapport pour le matériau représentant l'interface doit être choisie avec soin car ce rapport déterminera en quelque sorte la capacité de la réparation à se « décoller » du support.

Pour déterminer ce rapport qui représente la corrélation entre la résistance en traction et la cohésion, l'ensemble des données relative à cet aspect disponible dans la littérature ont été analysées. Les résultats présentés dans le tableau 11.3 et dans la figure 11.7 sont issus de (Saucier, 1990). L'analyse statistique de ses résultats est donnée dans le tableau 11.4.

Cette étude montre que quels que soient les bétons mis en contact, pour différentes valeurs d'adhérence et de cohésion, le rapport C/R_t est constant et vaut en moyenne 0,8. La droite de tendance a une pente de 1,2 [MPa/MPa]. Dans la suite des calculs de fissuration, a des fins de simplification, ce rapport sera pris constant et égal à 1, quel que soit le matériau de réparation utilisé.

Tableau 11.3: Données utilisées pour la détermination du rapport C/R_t

R_t	C	C/R_t
2,7	3,32	0,813
2,94	3,42	0,860
2,79	3,26	0,856
2,93	3,88	0,755
0,7	0,94	0,745
0,29	0,37	0,784

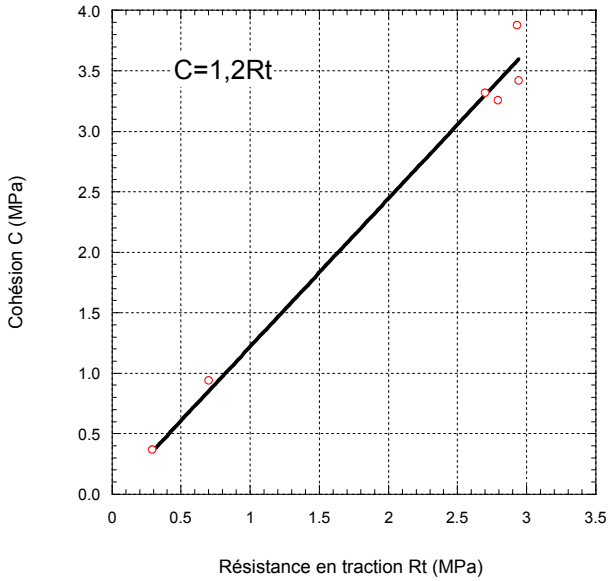


Figure 11.7: Évolution de la cohésion de l'interface entre différents bétons suivant la résistance en traction de cette interface

Tableau 11.4: Analyse statistique des valeurs C/R_t obtenues

Moyenne	0,802
Ecart type	0,049
Min.	0,753
Max.	0,851
Erreur (%)	6,1

11.4 MAILLAGES ET CONDITIONS AUX LIMITES UTILISÉS DANS L'ENSEMBLE DES SIMULATIONS NUMERIQUES

11.4.1 Maillages des structures réparées simulées

Les éléments réparés dont le comportement est simulé dans l'étude numérique sont des moitiés de poutres de longueur 1 m et de hauteur 0,395 m. Elles sont rehaussées d'une réparation de 25 mm, 50 mm ou 75 mm. Entre ces deux matériaux est insérée une couche d'éléments simulants la présence d'une interface ayant des propriétés mécaniques particulières. Cette couche a une épaisseur de 0,005 m. Les maillages utilisés sont présentés sur la figure 11.8. Dans ces maillages, le nombre d'éléments introduits tient compte des forts gradients de contraintes générés par le séchage. Ainsi, le nombre d'éléments introduits en surface des réparations est plus important qu'au cœur des poutres. En raison de la présence d'éléments de contact insérés entre chaque élément de volume des différents matériaux, la matrice de rigidité du système devient rapidement très volumineuse en espace mémoire. Cela nous a obligé à limiter le nombre d'éléments introduits dans les structures simulées.

Comme on peut le voir sur les maillages, le système étudié comporte 4 groupes correspondant soit à des matériaux différents soit à des lois de comportement différentes. En partant de la surface de la poutre, le premier groupe correspond au matériau de réparation. L'ensemble de ce groupe est modélisé par des éléments de contact probabilistes. Le second groupe correspond à l'interface. Il s'agit à nouveau d'un groupe constitué uniquement d'éléments de contact probabilistes. Une vue agrandie de ce groupe d'éléments modélisant l'interface est présenté sur la figure 11.9. Le troisième groupe correspond à la partie supérieure du support, c'est à dire la partie du support qui est contact avec la réparation par le biais de l'interface. Ce sous-groupe est uniquement constitué d'éléments de contact probabilistes de façon à pouvoir étudier la propagation éventuelle de fissures dans le support. Enfin, le dernier groupe d'éléments correspond à la partie inférieure du support. Il a été choisi de modéliser cette partie du système

par des éléments non probabilistes ayant un comportement élastique parfait. La figure 11.9 reprend la disposition des différents groupes d'éléments venants d'être décrits et constituants la structure dont le comportement est simulé.

11.4.2 Conditions aux limites simulées

Les calculs ont été réalisés en 2 dimensions. Dans la mesure où la longueur de la structure est environ 3,5 fois plus grande que sa largeur, nous avons fait l'hypothèse des contraintes planes ($\sigma_{zz} = 0$). Nous négligeons ainsi la rigidité transversale de la structure. Cette hypothèse s'avère au premier abord convenable dans la mesure où les premières fissures observées sur les réparations expérimentales sont uniquement des fissures transversales perpendiculaires à la longueur.

Afin d'alléger les calculs, une condition de symétrie a été appliquée et seulement une demi-poutre a été simulée. Enfin, l'extrémité de la poutre est posée sur appui simple. L'ensemble de ces conditions est représenté sur la figure 11.10.

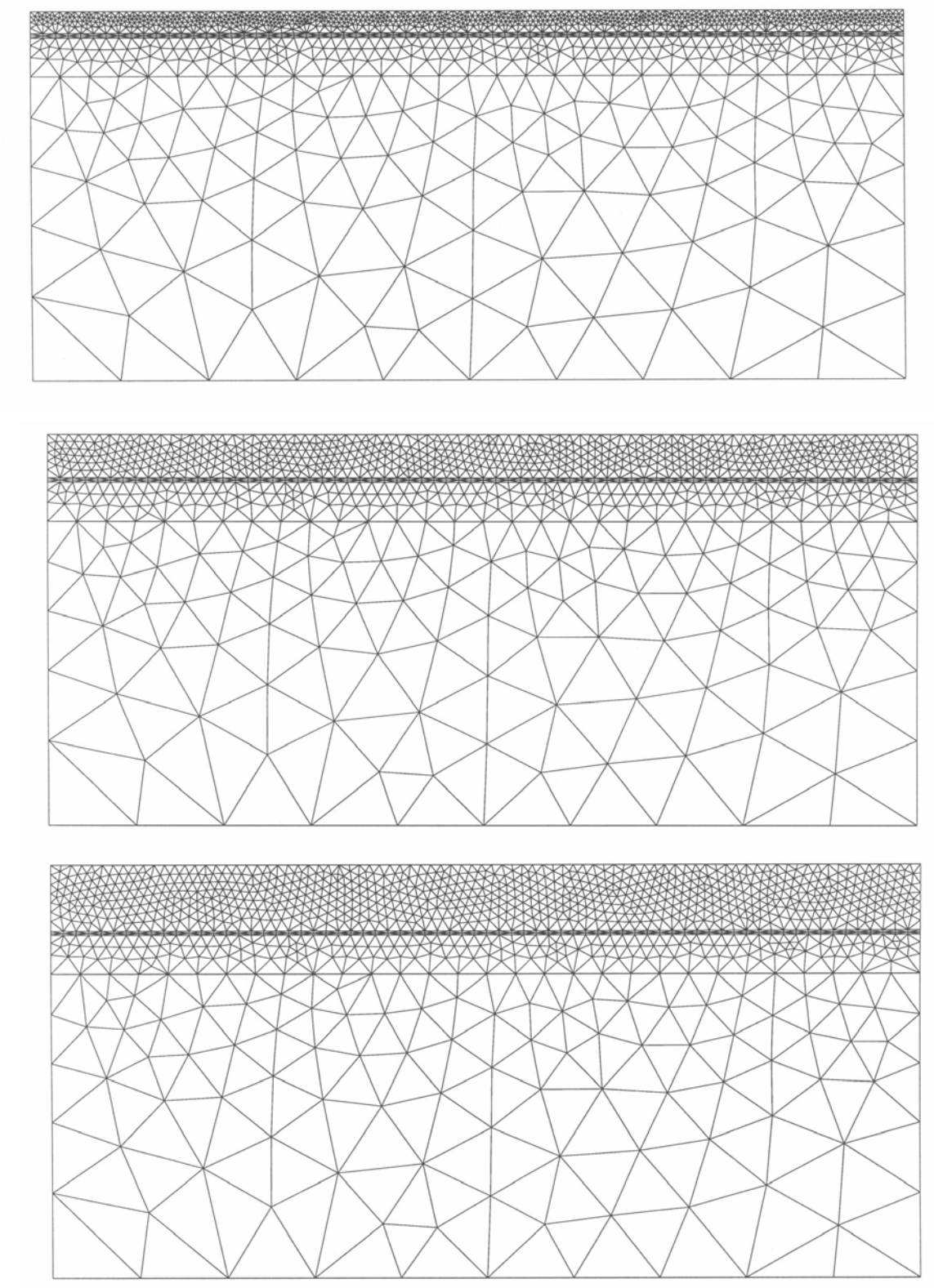


Figure 11.8: Maillage du système réparation-support utilisé dans les calculs (de haut en bas, réparation de 25 mm, 50 mm et 75 mm)

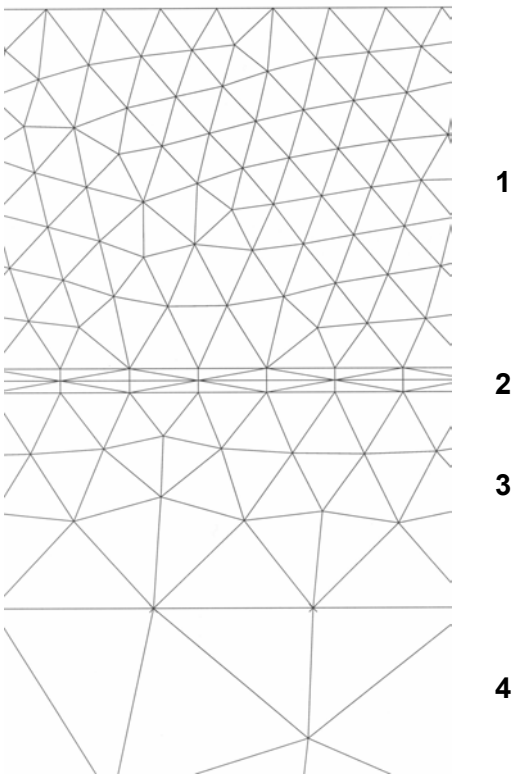


Figure 11.9: Détail de la zone du maillage correspondant à l'interface (groupe 1: réparation/éléments PROB, groupe 2: interface/éléments PROB, groupe 3: support/éléments PROB, groupe 4: support/éléments élastiques)

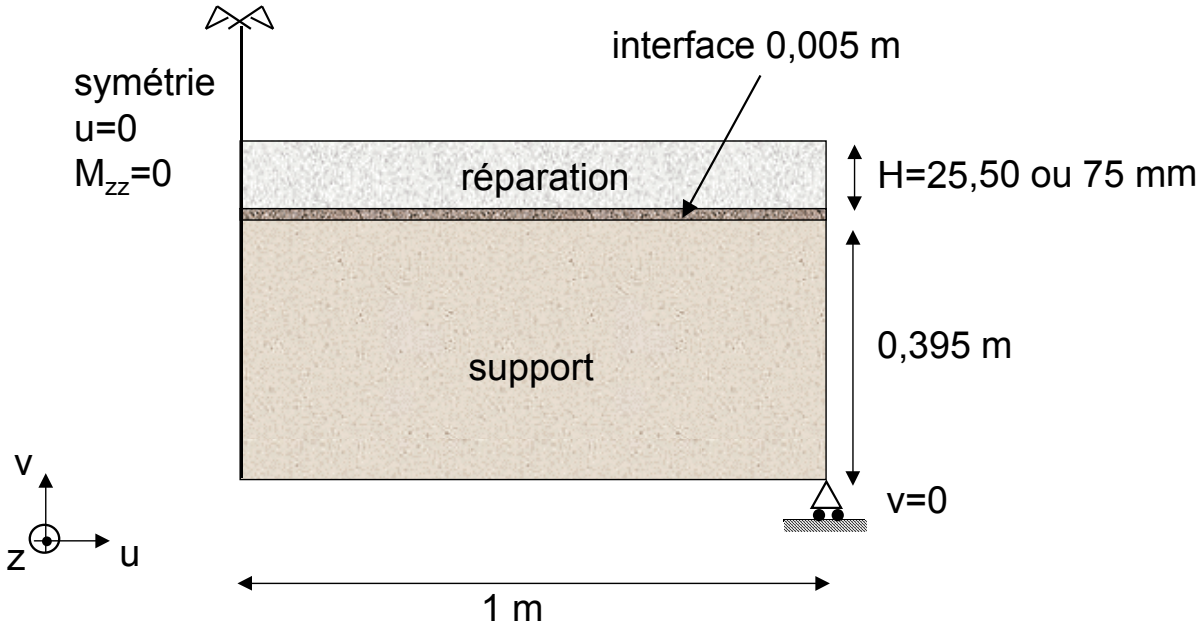


Figure 11.10: Conditions aux limites imposées lors des calculs

11.5 PROPRIETES DES MATERIAUX UTILISEES DANS L'ENSEMBLE DES CALCULS

Au cours des différentes parties de l'étude de la fissuration due au séchage dans un système réparation-support présentées dans ce chapitre, les propriétés mécaniques des divers matériaux présents au sein de la structure modélisée sont restées identiques. Les caractéristiques mécaniques ainsi que leur distribution sont données dans le tableau 11.5. Les valeurs minimales (min.) et maximales (max.) sont données à titre d'exemple car celles-ci ont varié suivant la distribution aléatoire réalisée par le module de fissuration probabiliste PROB.

Tableau 11.5: Propriétés mécaniques des différents matériaux utilisées dans les calculs

		MO	BO	BHP	SUPPORT
R_c (MPa)		36	40	60	35
D_{max} (mm)		5	10	10	20
R_t (MPa)	moy.	2,8	3,6	4,1	4,1
	min.	1,9	2,1	2,4	1,9
	max.	3,6	5,2	5,7	6,8
E (GPa)	moy.	23,8	33,8	34,9	49,7
	min.	21,8	28,8	30,4	39,7
	max.	25,8	39,1	40,5	57,9

Parmi les propriétés mécaniques des matériaux, la résistance en compression moyenne $R_c$moy et le module d'élasticité moyen Emoy sont des valeurs expérimentales issues des essais de caractérisation en laboratoire. La distribution aléatoire qui détermine les valeurs minimum et maximum est réalisée directement par le module PROB de CESAR-LCPC à partir du rapport entre le volume de la maille et le volume du plus gros granulat (relations données au paragraphe 11.1.3). La résistance en traction R_t est en revanche déterminée numériquement par calcul à partir des lois rapportées au paragraphe 11.1.3.

Au cours des calculs, les propriétés de l'interface entre le matériau de réparation et le support sont identiques à celles du matériau de réparation excepté le module d'élasticité $E_{réparation}$, fixée à 1 GPa (cf. paragraphe 11.2.3), et la résistance en traction R_t.

La résistance en traction moyenne de l'interface et le coefficient de variation associé utilisés dans les simulations devaient être les valeurs déterminées expérimentalement à 28 jours. La distribution aléatoire devait alors être réalisée par le module PROB à partir d'une loi statistique du type Student. Cependant, les résultats expérimentaux d'adhérence obtenus à 28 jours avec les réparations en béton ordinaire et en béton hautes performances ont présenté un coefficient de variation très élevé (de l'ordre de 20 à 30 %). Dans le cas du mortier ordinaire, il a été choisi d'utiliser les valeurs d'adhérence (moyenne et écart type) obtenues expérimentalement. En revanche, pour les deux autres matériaux, il a été décidé de laisser le module de fissuration probabiliste calculer la résistance en traction de l'interface à partir de la résistance en compression attribuée au matériau d'interface (équation 4 à 7, paragraphe 11.1.3). La résistance en compression de l'interface est fixée à une valeur qui permette d'obtenir une résistance en traction du même ordre de grandeur que celle obtenue avec le mortier ordinaire dans la mesure où la nature du matériau de réparation n'a pas eu d'effet significatif sur les valeurs d'adhérence obtenues en laboratoire (cf. Chapitre 7). Les propriétés mécaniques des différentes interfaces sont données dans le tableau 11.6. Les valeurs minimales et maximales sont une fois de plus données à titre d'exemple car celles-ci sont déterminées aléatoirement.

Tableau 11.6: Propriétés mécaniques des interfaces

		MO	BO	BHP
E (GPa)	moy.	1,0	1,0	1,0
	min.	0,8	0,8	0,9
	max.	1,1	1,2	1,1
R_t (MPa)	moy.	1,7	1,8	1,8
	min.	0,6	0,6	0,7
	max.	2,8	2,9	2,7

11.6 INFLUENCE DE LA RIGIDITE RELATIVE DU MATERIAU DE REPARATION ET DE L'INTERFACE SUR LA FISSURATION

Le module PROB de fissuration probabiliste du progiciel CESAR-LCPC ne permet pas aujourd'hui, lorsqu'il s'agit d'un couplage séchage-fissuration, de prendre en compte le caractère vieillissant des matériaux, et ne prend donc pas en compte l'évolution des propriétés mécaniques du matériau de réparation. Parmi les propriétés mécaniques du matériau, le module d'élasticité est l'une des plus influentes sur la réponse mécanique du système réparation-support et sur la fissuration qui est susceptible de s'y développer. Il a donc paru nécessaire de faire une étude préliminaire sur l'influence de ce paramètre afin de déterminer la valeur constante optimale qu'il faudra utiliser pour chaque matériau étudié. Dans cette partie de l'étude, une validation de la valeur de la rigidité de l'interface déterminée précédemment par calage numérique a également été réalisée. Pour cela, une comparaison des caractéristiques de la fissuration obtenue numériquement avec celle mesurée in situ sur les même éléments a été réalisée.

11.6.1 Simulations effectuées

Pour cette étude d'influence des rigidités relatives de l'interface et du matériau de réparation sur la fissuration, il a été choisi d'étudier le seul cas du mortier ordinaire avec une épaisseur de recouvrement de 50 mm. La résistance en traction de l'interface est la valeur d'adhérence obtenue en laboratoire par traction directe 28 jours après la mise en place de la réparation. Une adhérence moyenne de 1,6 MPa a été obtenue avec un écart type de 0,37 MPa. Dans les calculs, cette valeur de résistance en traction du matériau d'interface est distribuée aléatoirement au même titre que la résistance et que le module élastique des deux autres matériaux.

La structure étudiée est à nouveau une demi-poutre de longueur de 1 m et de hauteur 0,45 m, posée sur appuis (Figure 11.11). L'interface est modélisée avec un matériau identique au mortier ordinaire mais avec une rigidité pouvant être différente.

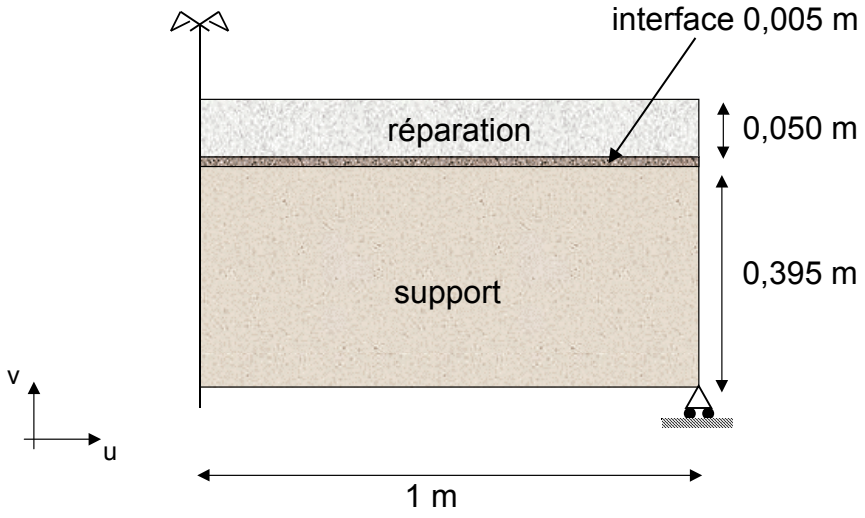


Figure 11.11: Structure utilisée pour l'étude de l'influence de la rigidité respective de l'interface et du matériau de réparation sur la fissuration

Tableau 11.7: Valeurs de rigidités testées

E_{rep} (GPa)	30	10	30	17,5	24
E_{int} (GPa)	30	10	1	1	1

Pour expliquer les choix des valeurs de rigidités respectives des 2 matériaux, l'évolution au cours du temps du module d'élasticité du mortier ordinaire mesuré en laboratoire est donnée dans la figure 11.12. Un module de 24 GPa et de 30 GPa correspond respectivement à la rigidité du matériau après 7 jours et 28 jours de mûrissement. Un âge de 7 jours pour le matériau correspond aussi l'apparition des premières fissures en surface des réparations expérimentales.

La figure 11.12 montre que le module du mortier ordinaire évolue rapidement entre 0 et 7 jours et de façon nettement plus lente entre 7 et 90 jours. L'évolution du module peut donc être considérée approximativement comme bilinéaire. Il était alors possible de calculer un module moyen pour chaque période d'évolution importante. Finalement, ces 2 modules moyens ont été pondérés par la vitesse de durcissement (MPa/j), pour donner un module équivalent (c'est à dire pondéré

par la vitesse de durcissement), qui dans le cas du mortier ordinaire prend une valeur de 17,5 GPa.

Temps (j)	E (GPa)
7	23,8
14	26,9
28	30,3
90	35,8

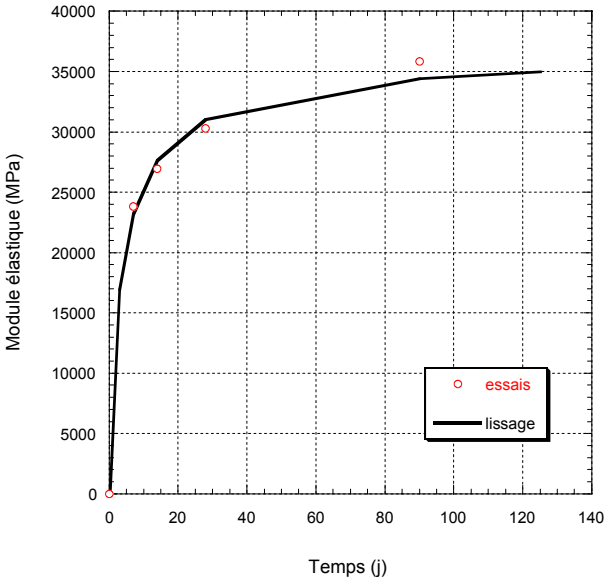


Figure 11.12: Evolution au cours du temps du module d'élasticité du mortier ordinaire

Enfin, un module de 10 GPa pour le matériau de réparation correspond à un module différé tenant compte du potentiel de fluage du matériau. Dans le code de béton armé français BAEL, le module effectif d'un béton se calcule de la façon suivante :

$$E_{\text{différé}} = \frac{E}{1+\phi} \qquad (11)$$

où :

- ϕ est le potentiel de fluage du béton considéré.

Pour une résistance en compression à 28 jours comprise dans l'intervalle [40-60] MPa, ϕ vaut 2, ce qui donne un module différé égal au $1/3$ du module nominal. Dans le cas du mortier ordinaire, où le module nominal est de 30 GPa, le module effectif prend alors une valeur de 10 GPa.

11.6.2 Résultats

Afin d'étudier l'effet de la rigidité relative des matériaux de réparation et d'interface, les résultats des calculs ont été comparés aux relevés de fissuration effectués en surface des réparations in situ en terme d'ouverture moyenne et maximale de fissure, d'espacement moyen entre fissures et de densité de fissuration.

- Comparaison des ouvertures moyennes de fissure et des espacements moyens entre fissures

Au moment des simulations numériques, seuls les relevés de fissuration expérimentaux après 2 semaines (14d) et après 3 mois (100d) de séchage étaient disponibles pour comparaison avec les résultats issus des calculs. La comparaison des résultats de fissuration numériques et expérimentaux est présentée dans le tableau 11.8.

Tableau 11.8: Comparaison des résultats de fissuration issus des calculs et des relevés expérimentaux après 14 jours et 100 jours de séchage

$E_{réparation}$ (GPa)		30	10	30	17,5	24
$E_{interface}$ (GPa)		30	10	1	1	1
Ouverture moyenne (µm) issue des calculs	14d	11	16	12	18	15
	100d	17	27	24	22	19
Ouverture moyenne (µm) issue des mesures	14d	19				
	100d	34				
Espacement moyen (cm) issu des calculs	14d	11	13	18	21	21
	100d	8	9	14	17	16
Espacement moyen (cm) issu des mesures	14d	28				
	100d	22				

Au regard des ouvertures moyennes et des espacements moyens, les résultats montrent que la fissuration du système réparation-support est très sensible à la rigidité donnée à l'interface et au matériau de réparation.

Le premier cas étudié ($E_{reparation}$=$E_{interface}$=30 GPa), qui semblait le plus logique au départ, s'est avéré être celui qui a donné les moins bons résultats. En effet, les ouvertures moyennes de fissure et les espacements moyens entre fissures obtenus sont nettement plus faibles que ceux mesurés expérimentalement. Ces résultats montrent ainsi que de telles valeurs de rigidité conduisent à un nombre de fissures plus important et à des ouvertures de fissure plus petites, donc à une fissuration trop importante, comparativement à ce qui a été observé en pratique.

L'utilisation d'un module différé de 10 GPa prenant en compte, de façon simplifiée, le comportement viscoélastique du matériau de réparation et de l'interface n'a pas non plus donné des résultats satisfaisants. Les ouvertures moyennes de fissure sont satisfaisantes par rapport aux ouvertures moyennes obtenues en pratique. En revanche, les espacements moyens entre fissures sont toujours nettement plus faibles que ceux mesurés expérimentalement, ce qui traduit à nouveau une fissuration trop importante. L'utilisation d'un module d'élasticité différé ne reproduit donc pas de manière adéquate le degré de restriction apporté par le support aux déformations de la réparation. Ce module différé ne permet donc pas de reproduire d'une manière satisfaisante le comportement viscoélastique et la fissuration du système réparation-support.

Les deux premiers cas étudiés, ($E_{reparation}$=$E_{interface}$=30 GPa) et ($E_{reparation}$=$E_{interface}$=10 GPa), confirment les résultats présentés au paragraphe 11.3 sur la nécessité d'introduire une rigidité pour l'interface différente et surtout plus faible que celle du matériau de réparation pour reproduire la restriction apportée par le support aux déformations de retrait de séchage et donc pour reproduire la fissuration due au séchage.

Un comportement très différent est observé lorsque le module de l'interface prend une valeur de 1 GPa comparativement aux cas où celui-ci est plus élevé. En effet, les espacements entre fissures obtenus sont plus importants et se rapprochent de ceux mesurés expérimentalement. Cela traduit des fissures moins nombreuses et donc une fissuration moins importante. Si l'on compare les 3 cas simulés, on

peut s'apercevoir qu'une variation du module d'élasticité du matériau de réparation, à rigidité de l'interface constante, a une influence sur les caractéristiques de la fissuration obtenue. Un module de 30 GPa conduit aux fissures les moins espacées et les moins ouvertes. Le cas le plus proche de la pratique est celui avec un module de 17,5 GPa, même si un module de 24 GPa donne aussi des résultats satisfaisants.

- Comparaison des ouvertures maximales de fissure et des schémas de fissuration

Pour compléter le bilan de cette étude sur l'influence de la rigidité relative du matériau de réparation et de l'interface, il est également intéressant de comparer les ouvertures maximales des fissures ainsi que les schémas de fissuration qui nous renseignent sur l'importance de la fissuration engendrée par le séchage en terme de densité de fissuration. Le tableau 11.9 présente une comparaison des ouvertures maximales de fissure obtenues lors des simulations et celles mesurées expérimentalement. Les schémas de fissuration pour chacun des cas simulés sont présentés sur les figures 11.13 à 11.22.

Tableau 11.9: Comparaison des ouvertures maximales de fissure

$E_{réparation}$ (GPa)		30	10	30	17,5	24
$E_{interface}$ (GPa)		30	10	1	1	1
Ouverture maximale (µm) issue des calculs	14d	16	24	18	20	18
	100d	30	39	33	47	29*
Ouverture maximale (µm) issue des mesures	14d	40				
	100d	55				

* Dans un autre calcul où les échanges hydriques entre la réparation et le support ont été rendus possibles, après 100 jours de séchage, l'ouverture maximale était de 50 µm avec ce couple de valeur de rigidité pour la réparation et l'interface.

L'ouverture maximale des fissures semble être moins sensible que l'espacement moyen entre fissure et que l'ouverture moyenne de fissure à la rigidité relative des matériaux d'interface et de réparation. En effet, les ouvertures maximales de fissure obtenues diffèrent peu d'un cas à un autre. Le tableau 11.9 montre également que les ouvertures maximales obtenues lors des simulations sont globalement plus faibles celles mesurées en pratique. Un module d'élasticité du matériau de réparation de 17,5 GPa avec une rigidité d'interface de 1 GPa génère l'ouverture maximale de fissure la plus proche de celle mesurée en pratique après 100 jours de séchage. Il faut cependant être conscient du fait que le caractère aléatoire du modèle de fissuration peut engendrer des variations d'ouverture maximale de fissure entre deux calculs pourtant réalisés avec les mêmes propriétés mécaniques moyennes, mais dont les distributions sont différentes.

Les figures 11.13 à 11.22 montrent l'influence de la rigidité relative des deux matériaux sur le schéma de fissuration obtenus lors des simulations. Ces schémas de fissuration nous renseignent sur la densité de fissuration interne obtenue pour chacun des cas simulés et illustrent ainsi les résultats présentés précédemment dans le tableau 11.9.

Les schémas de fissuration montrent une fois encore que la rigidité du matériau de réparation et de l'interface ont une influence significative sur la densité de fissuration interne. Plus les rigidités du matériau de réparation et de l'interface sont grandes et plus la fissuration est importante. Dans les cas où la rigidité est élevée (Figures 11.13 à 11.16), les fissures sont très nombreuses et sont après 100 jours déjà très profondes avec dans certains cas un début de fissuration horizontale au niveau de l'interface. Cela montre clairement que la rigidité utilisée pour modéliser l'interface (rigidité qui représente la restriction apportée par le support aux déformations de retrait) a beaucoup d'influence sur la réponse mécanique du système réparation-support. Dès qu'une interface avec une rigidité moindre (E_{int}=1 GPa) est introduite, la densité de fissuration diminue significativement et toute fissuration horizontale à l'interface disparaît (Figures 11.17 à 11.22). Pour une même rigidité de l'interface, le module d'élasticité du matériau de réparation défini le nombre de fissures et la profondeur de

fissuration. Plus son module élastique est important et plus les fissures sont nombreuses.

- Conclusions et choix de modélisation

Cette étude sur l'influence de la rigidité des matériaux sur la réponse en fissuration du système réparation-support montre que la rigidité du matériau de réparation et de l'interface sont des paramètres très importants. Le modèle de fissuration probabiliste de CESAR-LCPC ne nous permettant pas d'utiliser un module variable, un choix a du être fait sur la valeur constante à adopter pour la suite des calculs. Il a été décidé de prendre un module d'élasticité pour le matériau de réparation égal au module après 7 jours de mûrissement et une rigidité de l'interface égale à 1 GPa.

Le choix concernant le module d'élasticité du matériau de réparation s'explique de la façon suivante. Le module élastique du matériau de réparation à une forte influence sur l'espacement initial entre fissures. En revanche à plus long terme, avec l'avancement du séchage, c'est d'avantage la résistance en traction qui gouverne la propagation des premières fissures et l'initiation des nouvelles fissures. Il est donc nécessaire de choisir un module d'élasticité qui permette de retrouver l'espacement moyen entre les fissures qui s'initient aux premiers pas de temps de calcul. Or en pratique, les premières fissures sont apparues entre 7 et 10 jours après la mise en place des réparations. De plus, les évolutions du module d'élasticité des différents matériaux de réparations mis en œuvre expérimentalement montrent que la majeure partie du durcissement s'effectue au cours des 7 premiers jours de mûrissement et que par la suite les modules évoluent beaucoup plus lentement. Un module d'élasticité égal au module à 7 jours semble donc approprié. Ce choix est de plus conforté par les résultats de fissuration satisfaisants obtenus lors des calculs avec une telle valeur.

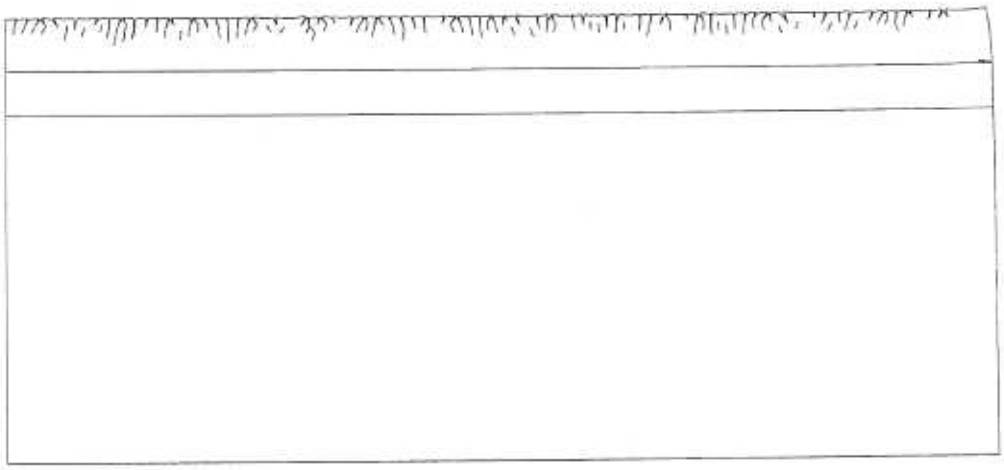


Figure 11.13: Schéma de fissuration obtenus pour E_{rep}=E_{in}t=30 GPa après 14 jours de séchage

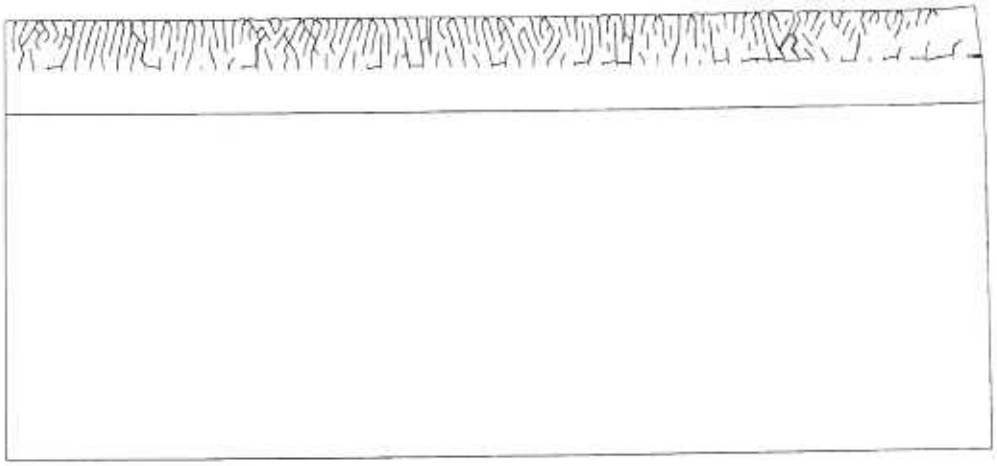


Figure 11.14: Schéma de fissuration obtenus pour E_{rep}=E_{in}t=30 GPa après 110 jours de séchage

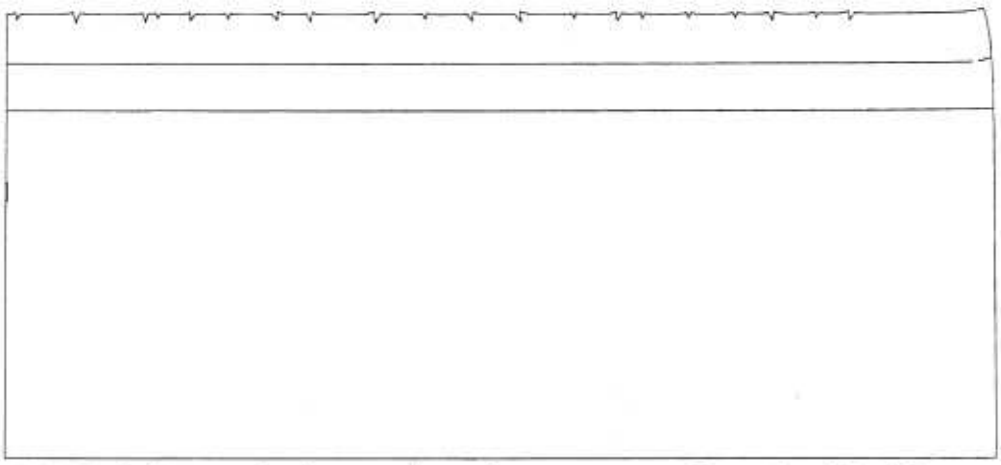


Figure 11.15: Schéma de fissuration obtenus pour $E_{rep}=E_{int}=10$ GPa après 14 jours de séchage

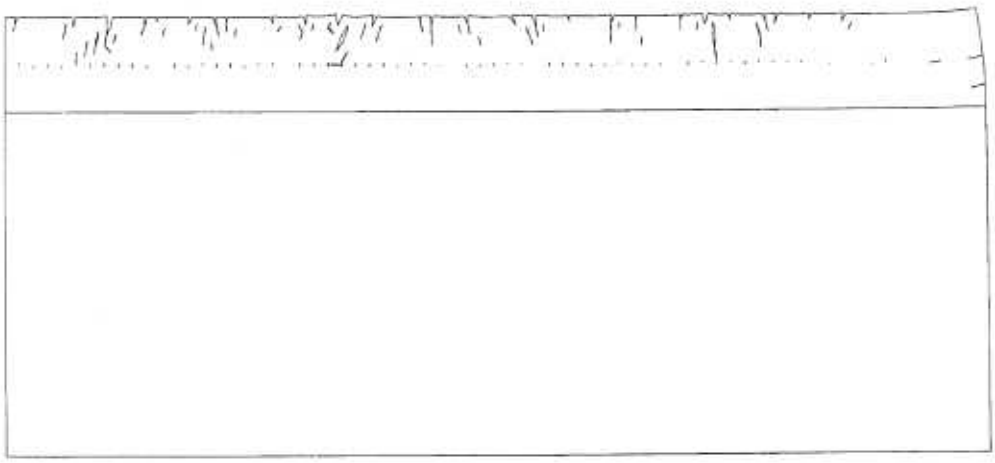


Figure 11.16: Schéma de fissuration obtenus pour $E_{rep}=E_{int}=10$ GPa après 110 jours de séchage

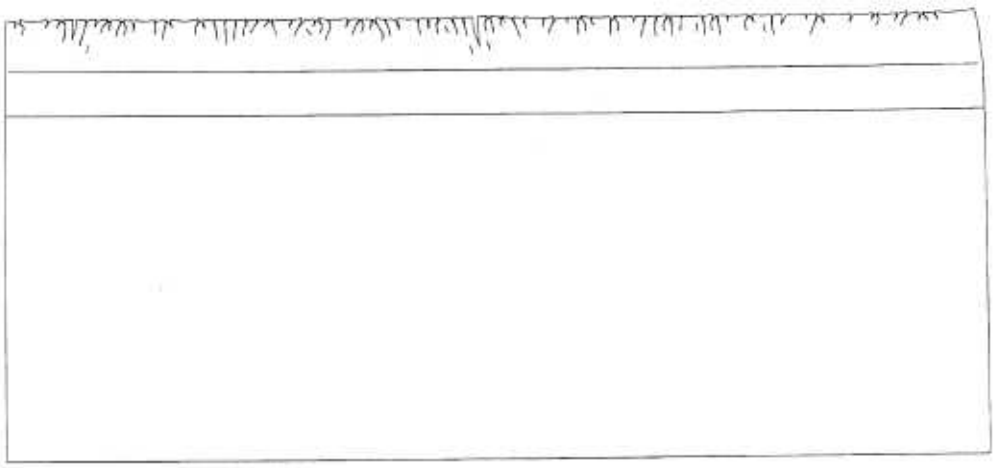


Figure 11.17: Schéma de fissuration obtenus pour E_{rep}=30 et E_{int}=1 GPa après 14 jours de séchage

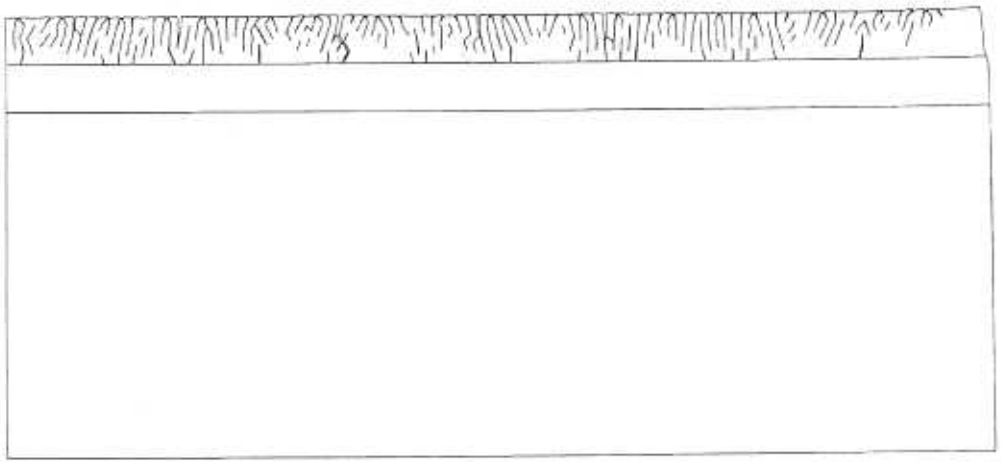


Figure 11.18: Schéma de fissuration obtenus pour E_{rep}=30 et E_{int}=1 GPa après 110 jours de séchage

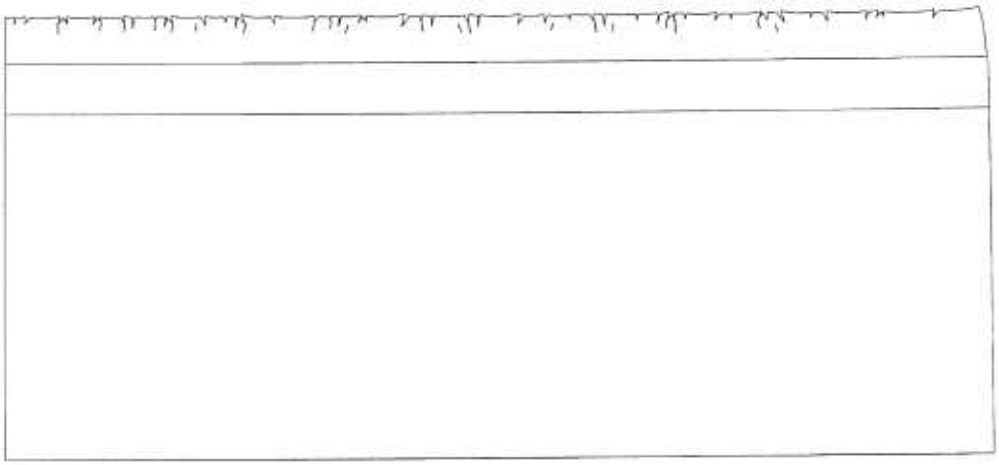


Figure 11.19: Schémas de fissuration obtenus pour E_{rep}=17,5 GPa et E_{int}=1 GPa après 14 jours de séchage

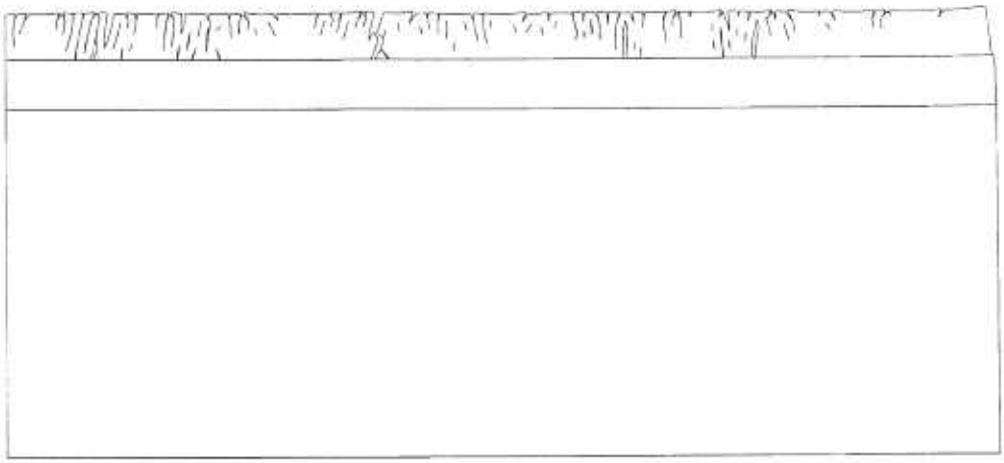


Figure 11.20: Schémas de fissuration obtenus pour E_{rep}=17,5 GPa et E_{int}=1 GPa après 110 jours de séchage

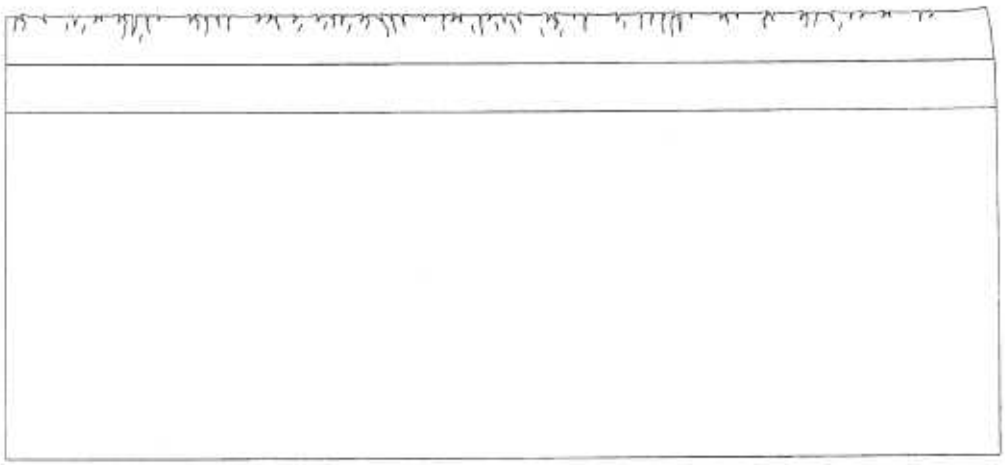


Figure 11.21: Schéma de fissuration obtenus pour E_{rep}=24 GPa et E_{int}=1 GPa après 14 jours de séchage

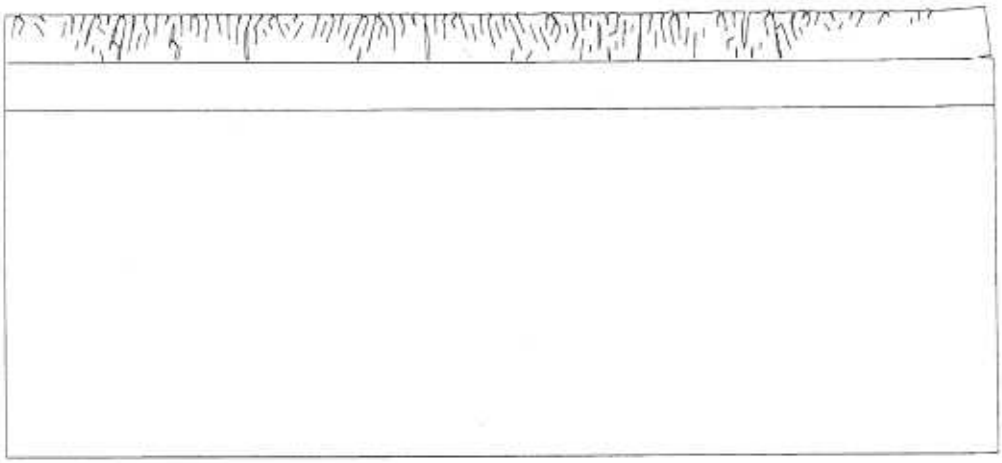


Figure 11.22: Schéma de fissuration obtenus pour E_{rep}=24 GPa et E_{int}=1 GPa après 110 jours de séchage

11.7 INFLUENCE DE L'EPAISSEUR ET DU MATERIAU SUR LA FISSURATION

Dans cette partie de l'étude numérique de la fissuration d'un système réparation-support, l'objectif était d'analyser l'influence de l'épaisseur de la couche de réparation et de la nature du matériau de réparation sur la fissuration engendrée par le séchage. Trois épaisseurs identiques à celles utilisées au cours de l'étude expérimentale in situ ont été simulées, à savoir 25 mm, 50 mm et 75 mm. Les matériaux étudiés sont le mortier ordinaire, le béton ordinaire et le béton hautes performances. Les maillages utilisés et les conditions aux limites sont identiques à ceux utilisés précédemment.

11.7.1 Influence de l'épaisseur de la réparation

Pour étudier l'influence de l'épaisseur de la réparation sur les caractéristiques de la fissuration obtenue, les résultats à 1 an pour les trois matériaux ont été analysés en terme d'ouverture moyenne et maximale de fissure, mais aussi en terme d'espacement moyen entre fissures. Les résultats sont présentés sur les figures 11.23, 11.24 et 11.25.

Globalement, plus l'épaisseur de réparation est importante et plus les ouvertures moyennes et maximales de fissure sont grandes et plus l'espacement moyen entre fissures augmente. Les différences sont toutefois relativement petites si l'on ne s'intéresse qu'aux ouvertures moyennes et maximales de fissure (figure 11.23 et 11.24). En revanche cette influence de l'épaisseur est beaucoup plus significative sur l'espacement moyen entre fissures (figure11.25).

Ces résultats reviennent à dire que plus l'épaisseur de la réparation est importante et moins les fissures sont nombreuses, mais en contrepartie plus elles sont ouvertes. Ces résultats traduisent ainsi le fait que plus l'épaisseur de la réparation est importante et moins la restriction offerte par le support aux déformations de retrait des matériaux de réparation est importante.

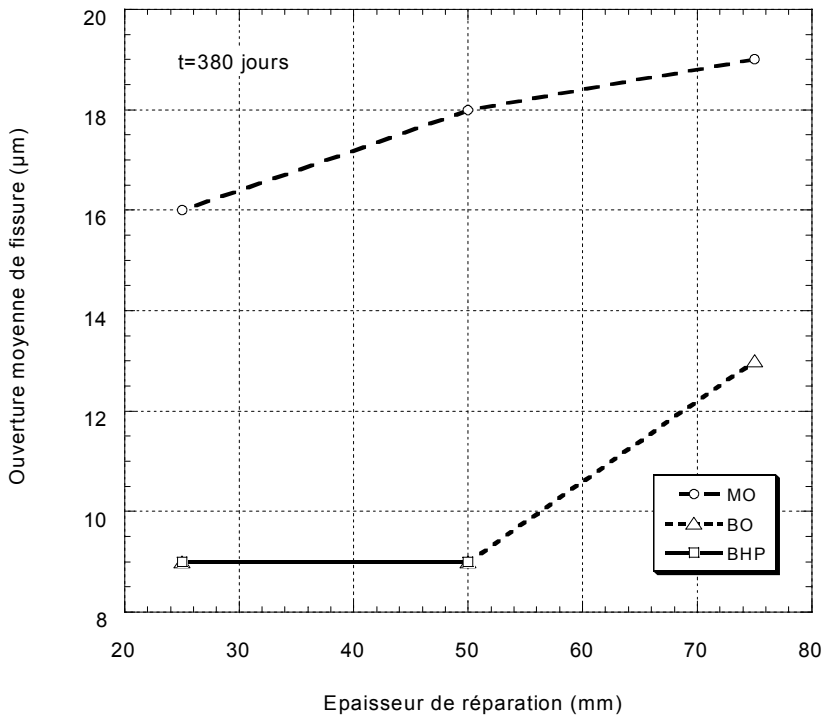


Figure 11.23: Influence de l'épaisseur sur l'ouverture moyenne de fissure

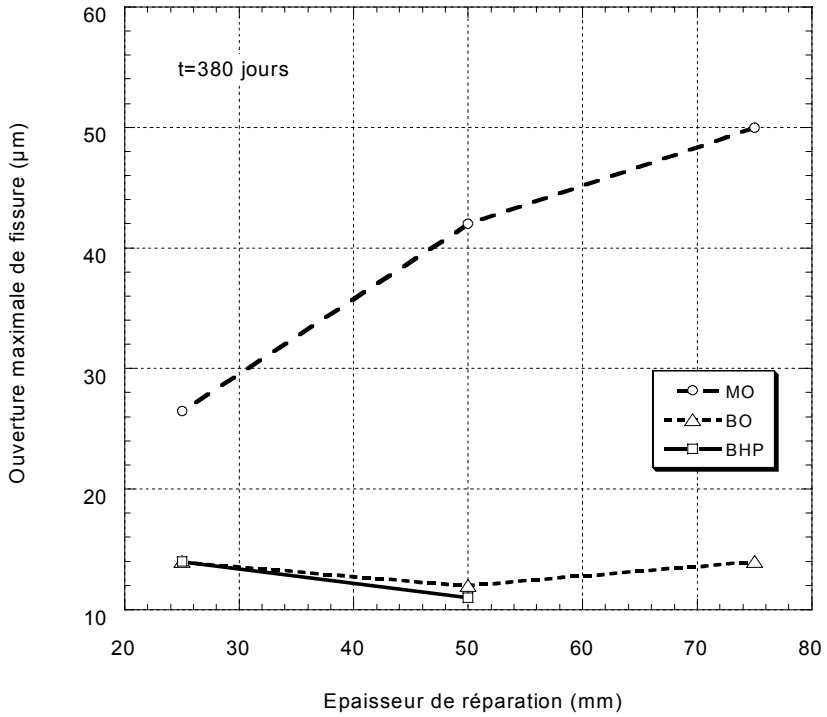


Figure 11.24: Influence de l'épaisseur sur l'ouverture maximale de fissure

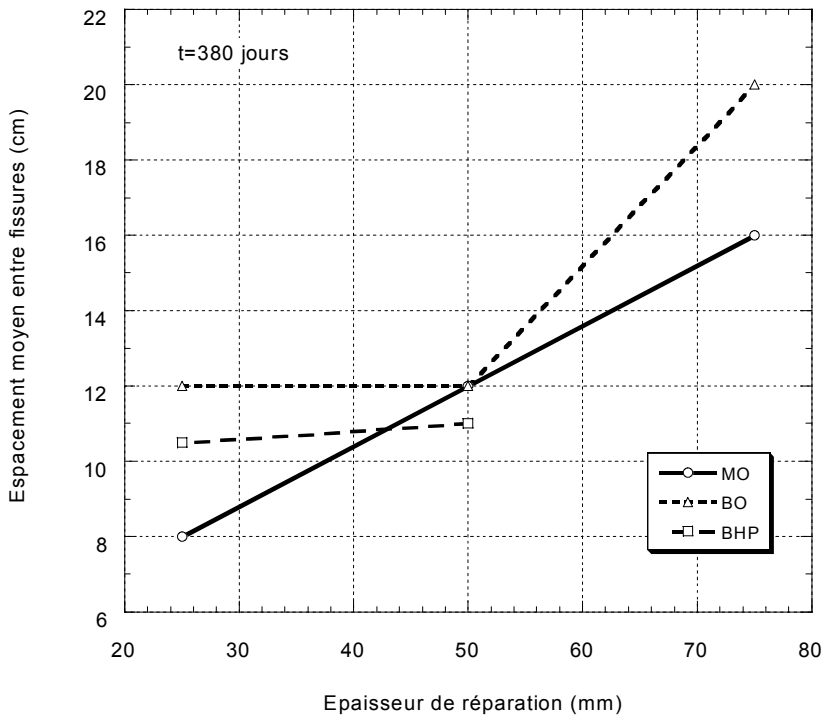


Figure 11.25: Influence de l'épaisseur sur l'espacement moyen entre fissures

Cet effet de l'épaisseur de la réparation sur les caractéristiques de la fissuration se retrouve également sur les schémas de fissuration interne, dont quelques exemples typiques sont montrés sur la figure 11.26. Comme le montrent les schémas de fissuration, plus l'épaisseur de la réparation est petite et plus la densité de fissuration est importante, c'est à dire plus le nombre de fissures est grand. Toutefois il apparaît important de remarquer que dans le cas de l'épaisseur de réparation 25 mm, les fissures sont très peu ouvertes comparativement aux fissures présentent sur le schéma de fissuration correspondant à l'épaisseur de réparation de 75 mm. Il est également important de remarquer que dans le cas de l'épaisseur de réparation 25 mm, la majeure partie des fissures se rendent à l'interface, ce qui n'est pas le cas pour l'épaisseur de 75 mm. En revanche, dans le cas de l'épaisseur de réparation de 75 mm, seules quelques fissures, correspondant aux fissures principales et qui sont aussi les plus ouvertes, se rendent à l'interface. Cela traduit bien l'effet de l'épaisseur de la réparation sur le comportement mécanique du système réparation-support.

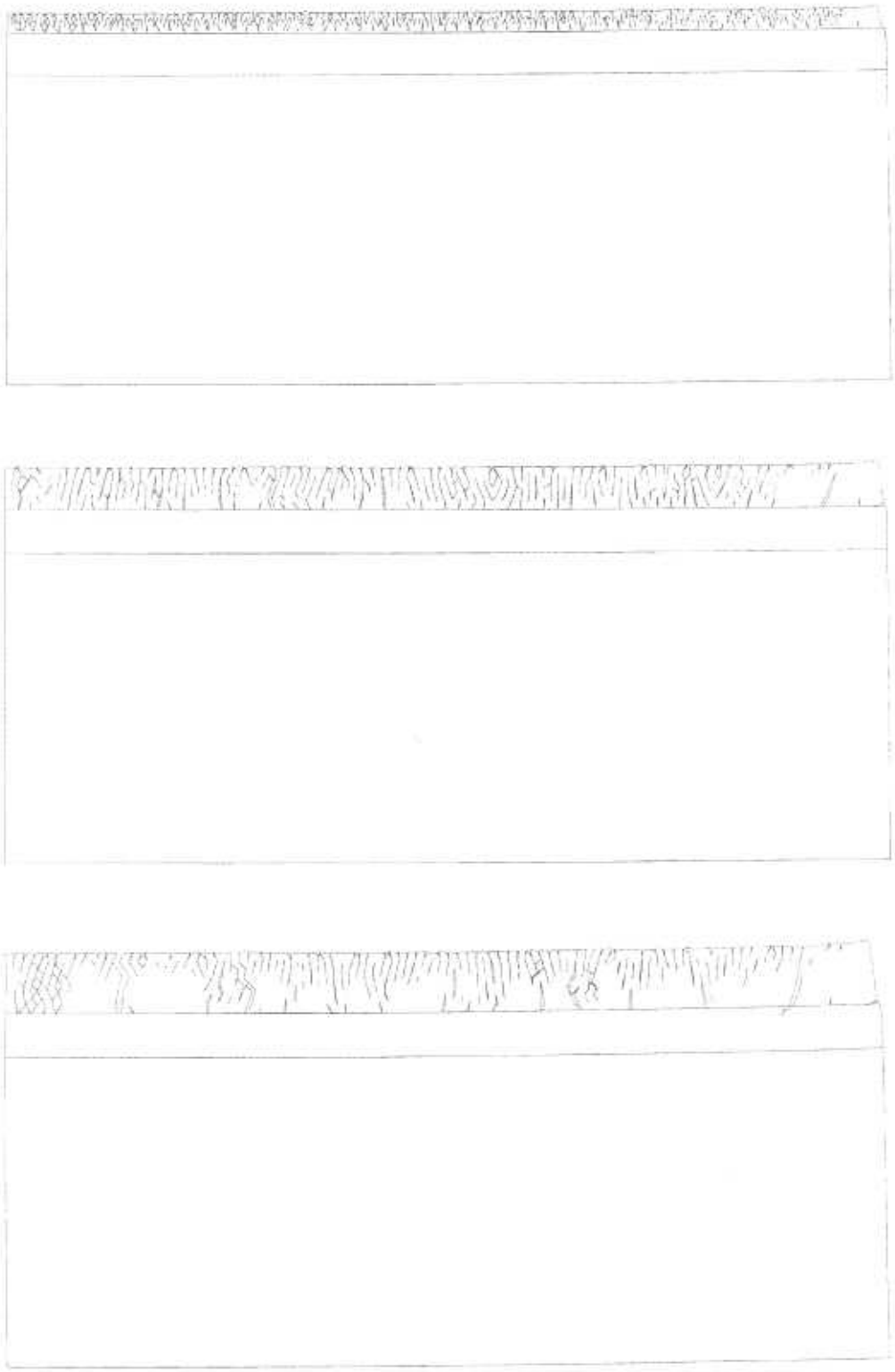


Figure 11.26: Influence de l'épaisseur de la réparation sur la fissuration (cas du mortier ordinaire, à t=380 jours avec de haut en bas h=25, 50 et 75 mm)

11.7.2 Influence de la nature du matériau de réparation

Les trois matériaux utilisés lors des simulations ont des coefficients de diffusion et des coefficients de contraction hydrique différents. Ce sont également des matériaux dont les propriétés mécaniques sont différentes notamment celles ayant une influence significative en situation de déformations empêchées, comme le module d'élasticité. Ces trois matériaux sont donc susceptibles d'avoir un comportement mécanique différent sous l'action de sollicitations hydriques. Dans cette partie de l'étude, la fissuration obtenue pour des réparations d'épaisseur 50 mm réalisées avec chacun des trois matériaux est analysée en terme de cinétique et d'amplitude de fissuration. Les différents schémas de fissuration sont aussi comparés.

- Ouvertures moyenne et maximale de fissure

Comme le montrent les figures 11.27 et 11.28, les ouvertures moyennes et maximales de fissure sont différentes selon le matériau de réparation utilisé. Après 380 jours de séchage, pour les épaisseurs de réparation de 25 mm et 50 mm, le mortier ordinaire présente des fissures dont les ouvertures moyenne et maximale sont nettement plus importantes que celles obtenues avec le béton ordinaire et le béton hautes performances. Dans le cas de l'épaisseur de réparation de 50 mm, après 380 jours de séchage, le mortier ordinaire présente une ouverture maximale de fissure 4 fois plus importante que celle du béton ordinaire et à hautes performances. Les différences sont moins significatives en ce qui concerne les ouvertures moyennes de fissure même si le mortier ordinaire présente des ouvertures moyennes d'un ordre de grandeur 2 fois plus important que le béton ordinaire et que le béton hautes performances. Les figures 11.27 et 11.28 montrent également que le béton ordinaire et le béton hautes performances présentent des ouvertures moyennes et maximales du même ordre de grandeur, quelle que soit l'épaisseur de réparation considérée, à savoir 25 mm ou 50 mm. Ce résultat n'est pas observé pour la réparation en mortier ordinaire dont les ouvertures de fissure sont nettement plus sensibles à l'épaisseur.

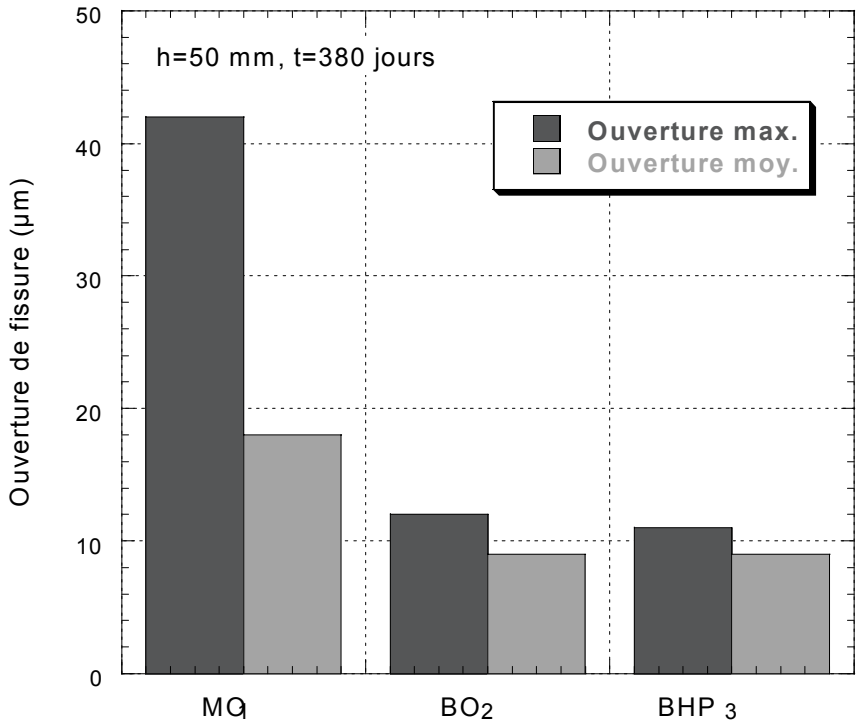


Figure 11.27: Influence de la nature du matériau sur les ouvertures maximale et moyenne de fissure (h=50 mm, t=380 jours)

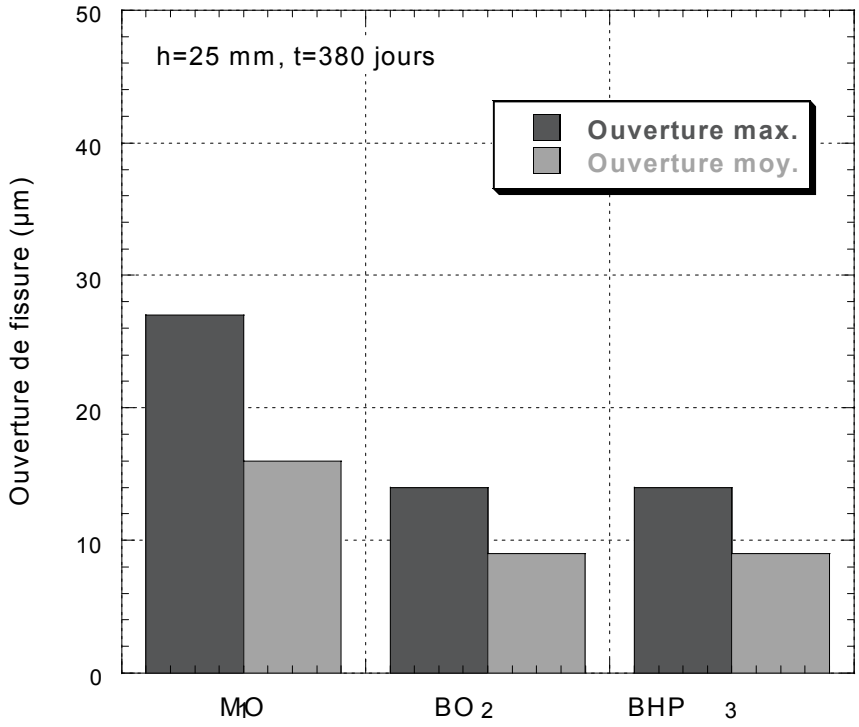


Figure 11.28: Influence de la nature du matériau sur les ouvertures maximale et moyenne de fissure (h=25 mm, t=380 jours)

- Cinétique de fissuration

Comparons maintenant les vitesses de développement de la fissuration interne obtenues lors des simulations. Les résultats sont présentés sur figures 11.29 et 11.30. De façon générale, deux phases peuvent être distinguées dans le développement de la fissuration. La première phase s'entend environ sur les 100 premiers jours de séchage. Elle correspond à une phase au cours de laquelle les ouvertures moyennes et maximales de fissure se développent rapidement. Il s'agit d'une phase d'initiation des fissures sous l'effet des gradients de teneur en eau importants qui sont générés au début du séchage. La seconde phase correspond à une phase de propagation et de stabilisation de la fissuration. En effet, au-delà des 100 premiers jours de séchage environ, les ouvertures moyennes et maximales de fissure se développent peu comparativement a ce qui a été observé au cours de la première phase. Cette phase correspond au développement des fissures sous l'effet de l'avancé en profondeur du séchage dans la réparation.

C'est principalement au cours de cette seconde phase de propagation et de stabilisation des fissures que des comportements différents sont observés suivant la nature du matériau de réparation. Dans le cas du mortier ordinaire, les ouvertures moyennes et maximales de fissure se développent plus rapidement et sur une période plus longue que dans le cas du béton ordinaire et à hautes performances. Les ouvertures de fissure ne semblent être stabilisées dans le cas du mortier ordinaire qu'à partir de 380 jours de séchage. À l'opposé, dans le cas du béton hautes performances, les ouvertures de fissure se stabilisent rapidement dès la fin de la phase d'initiation de la fissuration, c'est à dire avant les 100 premiers jours de séchage.

L'explication de ces différents comportements en fissuration se trouve dans l'analyse de leurs comportements au séchage. Si l'on regarde les profils de teneur en eau en fonction du temps pour chacun des 3 matériaux (chapitre 10, figure 10.5), dans le cas de l'épaisseur de réparation 50 mm, on s'aperçoit qu'au début du séchage, des gradients importants de teneur en eau sont générés proche de la surface. Ces gradients sont à l'origine de la fissuration qui se développe au cours de la première phase. Par la suite, les 3 matériaux ayant des coefficients de

diffusion différents et des quantités d'eau accessible au séchage différentes, leurs comportements au séchage et en fissuration sont différents. Le mortier ordinaire, qui est le matériau ayant le coefficient de diffusion le plus grand et la quantité d'eau libre la plus importante, continue à sécher de façon significative, tant en vitesse qu'en profondeur. Cela explique probablement dans son cas l'augmentation progressive des ouvertures moyennes et maximales de fissure observée avec l'augmentation de la durée de séchage. En revanche, le béton ordinaire et le béton hautes performances sont nettement moins sensibles au séchage de part leur coefficient de diffusion plus faible et leur quantité d'eau libre moins importante. Avec l'augmentation de la durée de séchage, leurs profils de teneur en eau évoluent peu, surtout dans le cas du béton hautes performances pour lequel, en trois ans, la profondeur de séchage reste très faible comparativement au mortier pour lequel l'équilibre avec le milieu extérieur est atteint sur toute l'épaisseur de la réparation. Après la phase d'initiation de la fissuration, dans le cas du béton ordinaire les ouvertures moyenne et maximale évoluent lentement alors que dans le cas du béton hautes performances celles-ci semblent déjà stabilisées.

Corrélés à l'évolution de l'espacement moyen entre fissures pour chacun des matériaux (figure 11.31), ces résultats nous fournissent des informations sur l'évolution au cours du temps de la densité de la fissuration au sein de la couche de réparation. La figure 11.31 montre qu'avec l'avancée du séchage, l'espacement entre fissures diminue, ce qui en d'autres mots signifie que le nombre de fissures augmente et donc que la densité de fissuration devient plus importante. Comme nous venons de le voir précédemment, l'ouverture moyenne de fissure évoluant peu au cours de la phase de propagation, cela signifie que la diminution de l'espacement entre fissures traduit l'apparition de nombreuses microfissures d'ouverture de l'ordre 1 à10 µm.

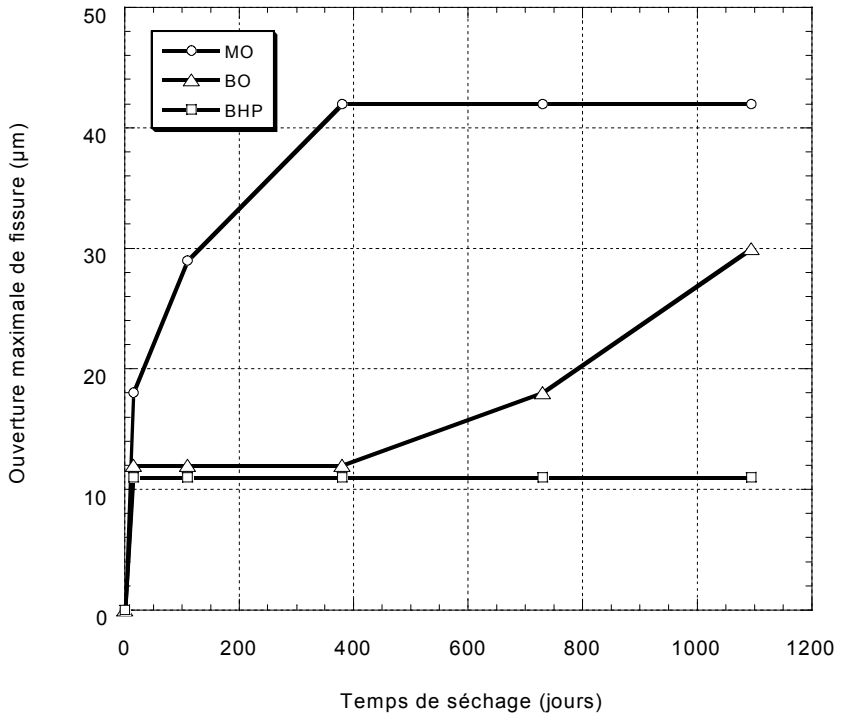


Figure 11.29: Évolution de l'ouverture maximale de fissure en fonction du temps (cas des réparations de 50 mm)

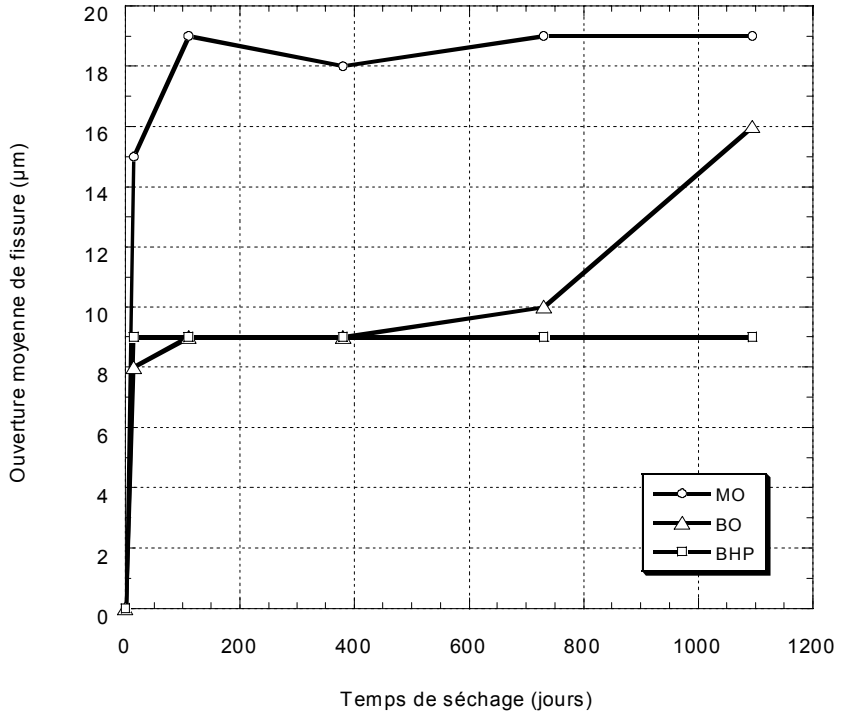


Figure 11.30: Évolution de l'ouverture moyenne de fissure en fonction du temps (Cas des réparations de 50 mm)

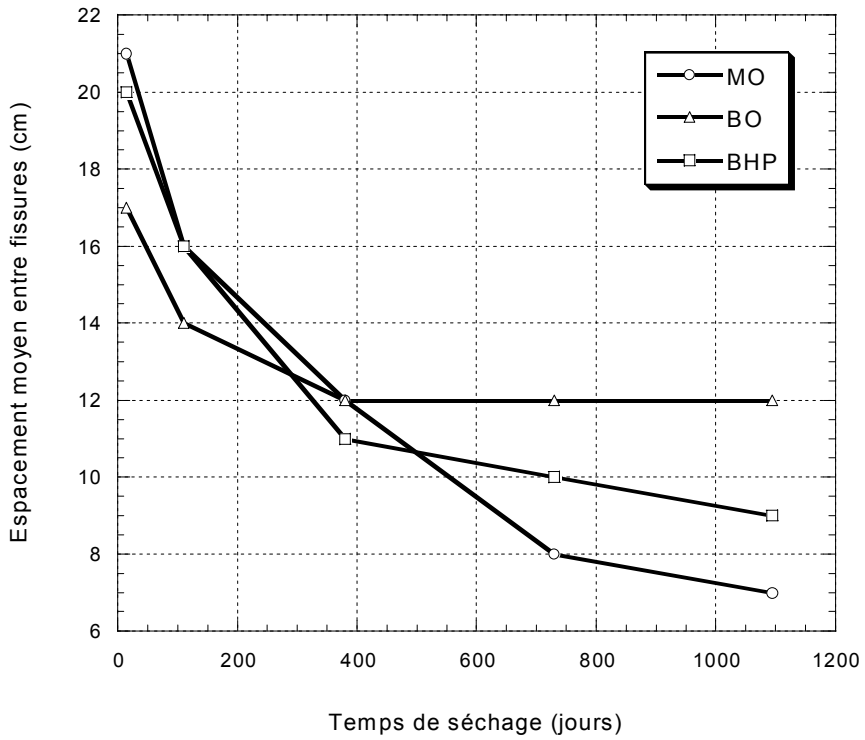


Figure 11.31: Évolution de l'espacement moyen entre fissures au cours du temps (Cas des réparations de 50 mm)

- Densité de fissuration interne

Pour illustrer l'ensemble de ces résultats concernant le mode de fissuration et la cinétique de fissuration du système réparation-support selon la nature du matériau de réparation, il est également intéressant d'observer les schémas de fissuration interne obtenus. Ces schémas de fissuration donnent accès à la densité de fissuration mais également à la profondeur atteinte par les fissures.

Les schémas de fissuration illustrants l'influence du matériau sont donnés à la figure 11.32. Il s'agit du cas de la réparation de 50 mm après 380 jours de séchage. Cet exemple montre clairement que pour une même épaisseur de réparation, le mortier ordinaire développe un réseau de fissures dont la densité est nettement plus importante que celle développée dans le cas du béton ordinaire ou du béton à hautes performances. Il faut également remarquer que le béton à hautes performances est le matériau dont la densité de fissuration est la moins importante. Après 380 jours de séchage la fissuration de la réparation en béton hautes performances reste une fissuration superficielle avec des fissures

peu profondes et peu ouvertes (ouverture moyenne de 11 µm). En revanche, après 380 jours de séchage, la fissuration dans la réparation en mortier ordinaire est très importante. De nombreuses fissures atteignent dans ce cas l'interface avec le support sans toutefois provoquer de délamination. Ces schémas de fissuration nous montrent également que malgré une densité de fissuration en apparence importante, la fissuration dans la réparation se traduit en fait par une multitude des microfissures pratiquement invisibles, d'ouverture inférieure à 10 µm. Cette microfissuration importante n'empêche cependant pas la propagation de certaines fissures principales en profondeur dans la réparation comme le montrent les schémas de fissuration, notamment dans le cas du mortier ordinaire.

La cinétique de développement de la fissuration interne dans le cas de la réparation en mortier ordinaire de 50 mm d'épaisseur est illustrée par les schémas de fissuration présentés aux figures 11.33 à 11.37. Le comportement à deux phases, observé à partir des courbes d'évolution des ouvertures de fissure et de l'espacement entre fissures en fonction du temps, se retrouve clairement sur ces schémas de fissuration. Une phase d'initiation de la fissuration est observée jusqu'à 380 jours de séchage (figure 11.34 à 11.36) et une phase de propagation et de stabilisation est observée entre 380 jours et 1095 jours de séchage (figure 11.36 à 11.38). Au cours de la première phase on assiste à la création et au développement en ouverture et en profondeur des fissures principales, c'est à dire des fissures qui seront les plus ouvertes et les plus profondes. Pendant cette première phase, la densité de fissuration augmente beaucoup. Au plan hydrique, cette première phase correspond à la période du séchage où les gradients de teneur en eau sont les plus importants. Au-delà de 380 jours, la fissuration se propage plus lentement et semble finalement se stabiliser. Au cours de cette seconde phase, les fissures principales se développent peu, tant en ouverture qu'en profondeur, puisqu'elles ont pour la plupart déjà atteint l'interface avec le support. On assiste surtout à la création de nouvelles microfissures très peu ouvertes au sein de la réparation. Durant cette seconde phase, la densité de fissuration, déjà importante, évolue peu. Cette seconde phase correspond à la progression du séchage au cœur de la réparation, période de séchage au cours de

laquelle les gradients de teneur en eau sont moins importants et au cours de laquelle l'équilibre avec le milieu extérieur s'établit lentement au sein de la couche de réparation.

- Conclusion

Ces résultats indiquent que la composition du matériau de réparation est un paramètre important pour les problèmes de fissuration due au retrait de séchage empêché. Plus la quantité d'eau accessible au séchage et plus le coefficient de diffusion du matériau sont importants, plus la fissuration sera rapide et importante, à la fois en terme d'ouvertures moyenne et maximale de fissure et en terme de densité et de profondeur de fissuration. Autrement dit, l'échelle de temps et l'importance de la fissuration due au séchage dans un système réparation/support sont principalement déterminés par les propriétés hygrométrique du matériau. Il faut également remarquer que pour les trois matériaux de réparation testés, aucune délamination n'a été observée, même dans des conditions de séchage sévères. Les différents résultats présentés dans cette partie de l'étude numérique montrent aussi que des paramètres comme l'épaisseur de la réparation et les propriétés mécaniques du matériau ont une influence significative sur la fissuration générée par le séchage. Plus l'épaisseur sera importante et plus les fissures seront espacées mais en contrepartie plus elles seront ouvertes. De plus, les matériaux ayant le potentiel de séchage le plus faible sont aussi des matériaux développant de meilleures propriétés mécaniques, du fait de leur microstructure plus dense. Ce sont des matériaux pour lesquels la fissuration se propagera plus lentement et notamment moins en profondeur dans la réparation.

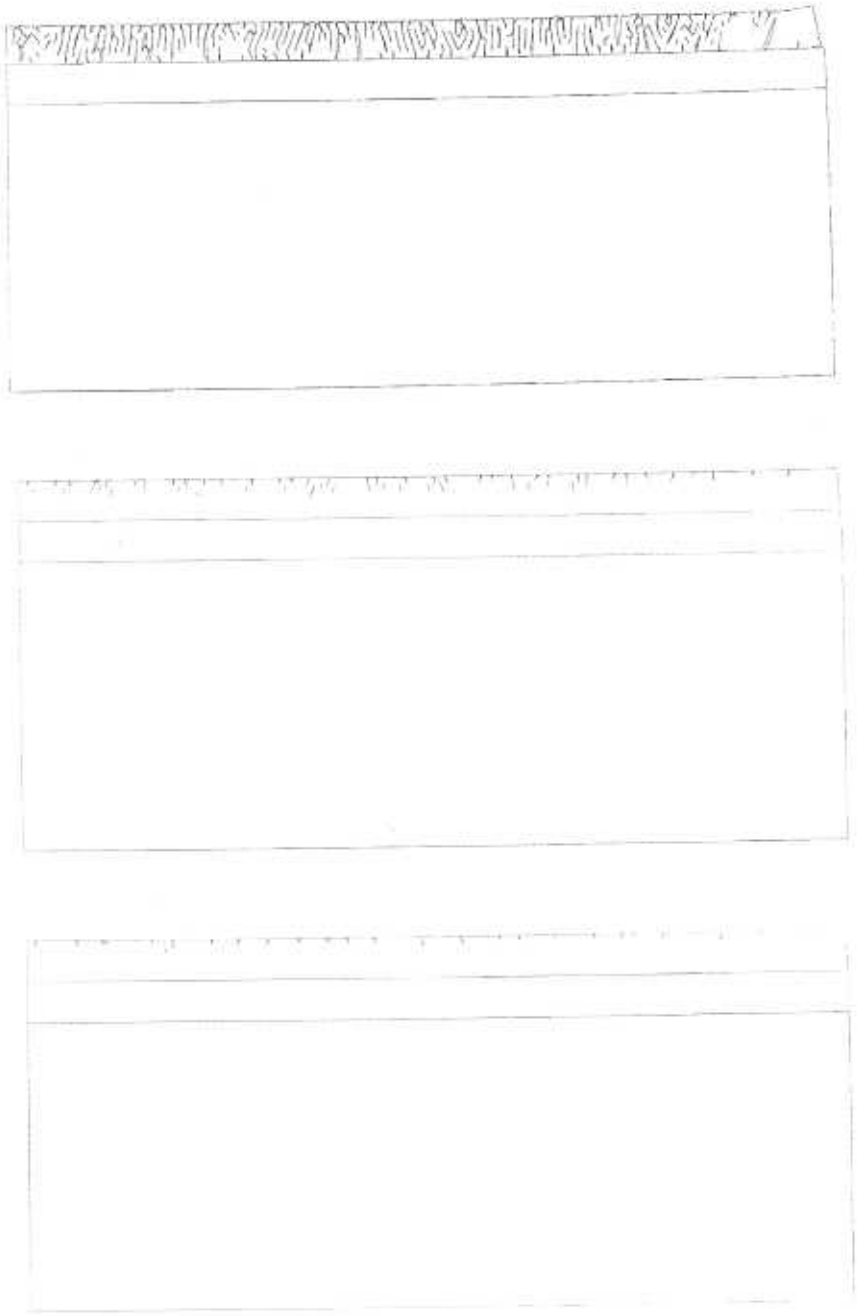


Figure 11.32: Influence de la nature du matériau (h=50 mm, t=380 jours avec de haut en bas : mortier ordinaire, béton ordinaire et béton hautes performances)

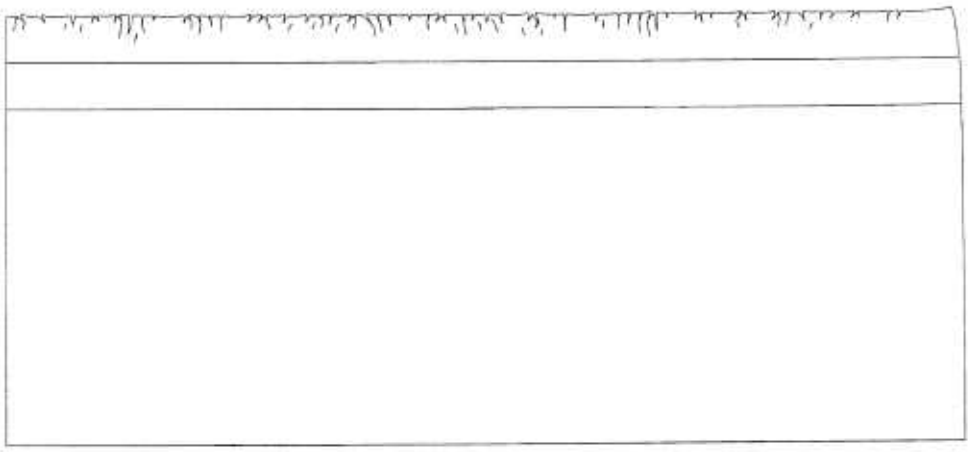


Figure 11.33: Schéma de fissuration de la réparation de 50 mm en mortier ordinaire après 14 jours de séchage

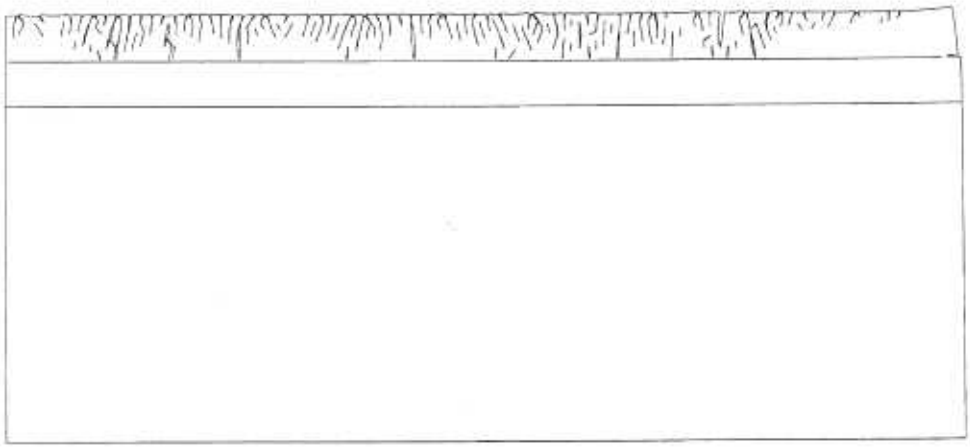


Figure 11.34: Schéma de fissuration de la réparation de 50 mm en mortier ordinaire après 110 jours de séchage

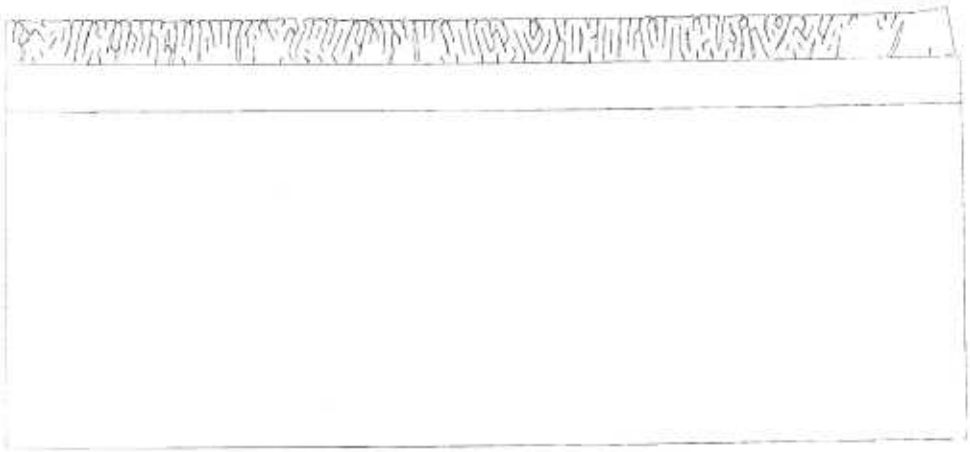


Figure 11.35: Schéma de fissuration de la réparation de 50 mm en mortier ordinaire après 380 jours de séchage

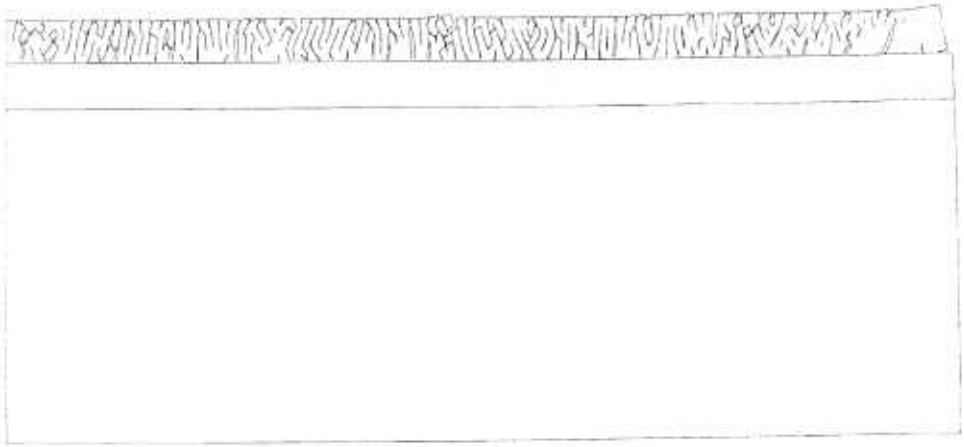


Figure 11.36: Schéma de fissuration de la réparation de 50 mm en mortier ordinaire après 730 jours de séchage

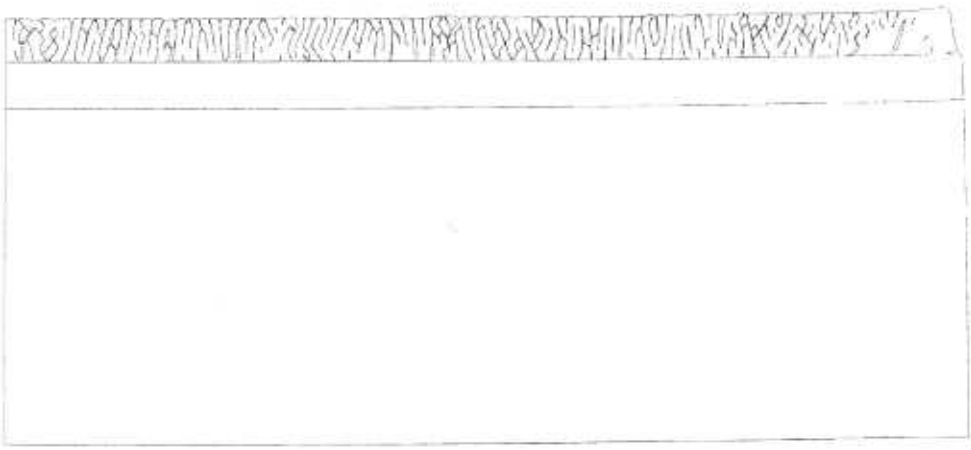


Figure 11.37: Schéma de fissuration de la réparation de 50 mm en mortier ordinaire après 1095 jours de séchage

11.7.3 Conclusions

Dans cette partie de l'étude numérique de la fissuration due au séchage, nous avons pu nous rendre compte que l'épaisseur de la réparation et la nature du matériau de réparation sont deux paramètres ayant une influence significative sur les caractéristiques de la fissuration. Les principaux résultats sont les suivants :

- Pour un matériau donné et pour une durée de séchage donnée, une variation d'épaisseur entraîne une variation de densité de fissuration, de profondeur de fissuration et d'ouverture de fissure. Plus l'épaisseur est petite, plus la densité de fissuration est grande, c'est à dire plus le nombre de fissures est important. En contrepartie une diminution de l'épaisseur de réparation entraîne une diminution des ouvertures moyenne et maximale de fissure.

- La nature du matériau de réparation joue un rôle sur la fissuration dans la réparation au travers des propriétés hygrométriques et mécaniques du matériau. Les caractéristiques de diffusion (diffusivité et teneur en eau libre) ont une incidence directe sur la fissuration car elles gouvernent la cinétique et l'amplitude du séchage du matériau. Un coefficient de diffusion important et une quantité d'eau libre importante entraînent, une fissuration à la fois plus rapide et plus importante. Les propriétés mécaniques du matériau jouent aussi un rôle important sur les caractéristiques de la fissuration. Plus le matériau est rigide et plus la densité de fissuration est importante, favorisant ainsi la création de nombreuses microfissures peu espacées et dont l'ouverture reste inférieure à 10 μm. Globalement, les calculs montrent qu'à court terme, les propriétés mécaniques du matériaux influent sur la fissuration initiale. A long terme ce sont d'avantage les propriétés hygrométriques du matériau qui déterminent l'importance de la fissuration.

- Dans tous les calculs, la grande majorité des fissures sont des fissures verticales. Cela nous montre que les contraintes principales sont orientées de telle sorte que le matériau est soumis à une traction ne sollicitant pas

l'interface. Ainsi, aucune délamination ou début de décollement de la réparation n'a été observé, en dehors des zones de régularisation des contraintes aux extrémités des éléments réparés. Cet aspect demande toutefois à être confirmé en rendant possible les échanges hydriques au travers de l'interface permettant ainsi son chargement par des contraintes de traction et créant ainsi une possibilité de propagation des fissures au-delà de l'interface.

11.8 FISSURATION DUE AUX ECHANGES HYDRIQUES AVEC LE SUPPORT

Dans un système réparation-support, les échanges hydriques entre le matériau de réparation et le support peuvent être source de contraintes et générer de la fissuration dans la zone d'interface. Non seulement l'état hydrique du support est important au moment de la mise en place de la réparation pour le développement d'une adhérence satisfaisante entre les deux matériaux, mais il conditionne également la nature et l'importance des échanges hydriques de part et d'autre de la zone d'interface. Un support trop sec pourra ainsi provoquer un "pompage" de l'eau du matériau de réparation et ainsi solliciter la zone d'interface de la même façon qu'un séchage en surface. Dans le cas d'une réparation de faible épaisseur, le séchage par échange hydrique avec le milieu extérieur peut atteindre la zone d'interface et se propager dans le support, créant ainsi des contraintes de traction dans le support qui peuvent jouer un rôle important sur la propagation des fissures de retrait au-delà de l'interface. Ces différents aspects du comportement hydrique d'un système réparation-support apparaissent importants mais n'ont jamais été mis en évidence de façon claire tant expérimentalement que numériquement. Dans cette partie du chapitre 11, une analyse des échanges hydriques entre la réparation et son support et de leur répercussion sur le plan mécanique est menée afin de mieux cerner leur influence sur la fissuration des réparations.

11.8.1 Pompage de l'eau du matériau de réparation par le support

Pour simuler le pompage de l'eau du matériau de réparation par le support, un coefficient de diffusion a été introduit pour le matériau du support et les échanges d'humidité ont été permis à travers l'interface. Les résultats de ces calculs sont présentés au Chapitre 10, paragraphe 10.1.5 et principalement à la figure 10.6. Des calculs mécaniques ont également montré, dans le cas parfaitement élastique, que ce pompage engendre des contraintes de traction dans le matériau de réparation dans la zone proche de l'interface et cela

rapidement après la mise en place de la réparation (cf. paragraphe 10.2.4 et figure 10.11). Regardons maintenant la fissuration qui pourrait être causée par le pompage du support. Les simulations effectuées concernent les 3 matériaux (mortier ordinaire, béton ordinaire et béton hautes performances) et correspondent au cas de la réparation d'épaisseur 50 mm.

- Cinétique et densité de la fissuration due au pompage: cas du mortier ordinaire

Comme le montrent les schémas de fissuration (figures 11.38 à 11.40), des fissures apparaissent dans la zone d'interface 14 jours après le début du séchage et des échanges hydriques avec le support. En surface, la fissuration obtenue est identique à celle obtenue en situation de séchage sans pompage du support. Les fissures dans la zone d'interface sont régulièrement espacées. Elles sont aussi moins nombreuses que les fissures de surface. Ces schémas de fissuration montrent également que les fissures créées par le pompage du support sont moins ouvertes que les fissures principales de surface. Après 14 jours de séchage, les fissures dues au pompage remontent peu dans l'épaisseur de la réparation, alors que les fissures principales de surface sont déjà profondes et se rendent pour certaines d'entre elles jusqu'à l'interface. En revanche, dès 110 jours de séchage, il devient difficile de distinguer les fissures créées par le séchage ou par le pompage du support car la majorité d'entre elles ont fini par se rejoindre. Une fois encore, les fissures créées par le pompage du support sont orientées perpendiculairement à la ligne d'interface. Cela montre une fois de plus que la zone d'interface n'est pas sollicitée de manière à induire des contraintes de traction pouvant conduire à un décollement de la couche de réparation.

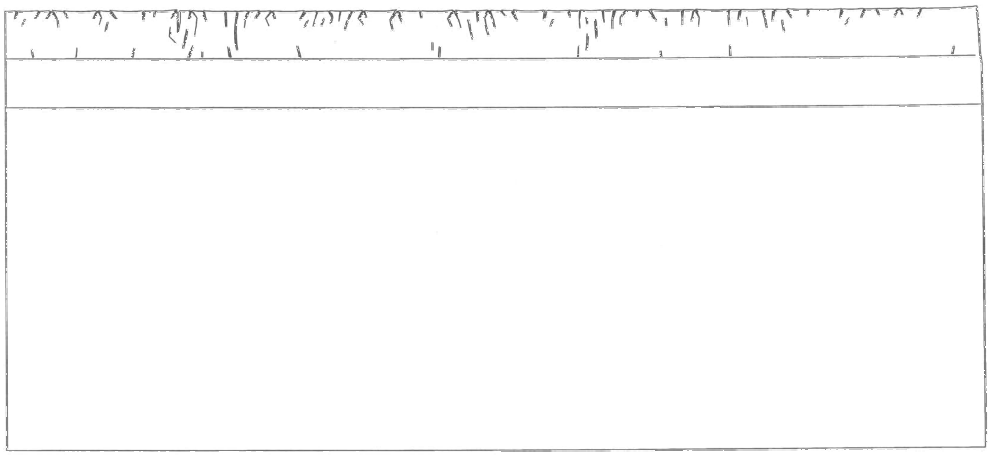


Figure 11.38: Schéma de fissuration de la réparation de 50 mm en mortier ordinaire après 14 jours de séchage avec pompage du support

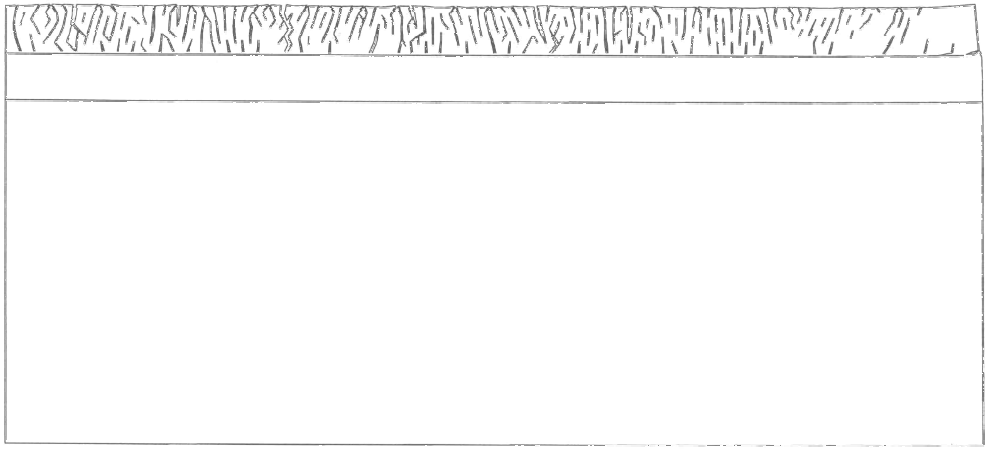


Figure 11.39: Schéma de fissuration de la réparation de 50 mm en mortier ordinaire après 110 jours de séchage avec pompage du support

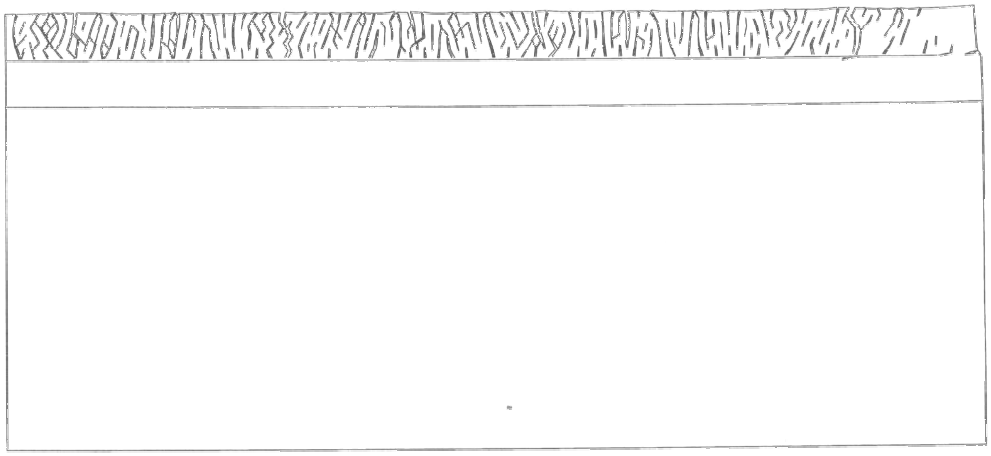


Figure 11.40: Schéma de fissuration de la réparation de 50 mm en mortier ordinaire après 380 jours de séchage avec pompage du support

Comparons maintenant l'évolution des ouvertures moyenne et maximale de fissure obtenues en surface avec celles obtenues dans la zone d'interface, en fonction de la durée de séchage. Les résultats sont présentés à la figure 11.41. Cette figure montre qu'au début des échanges hydriques, la vitesse d'ouverture moyenne de fissure en surface est plus importante que la vitesse d'ouverture moyenne de fissure dans la zone d'interface. Dès 110 jours de séchage, les ouvertures moyennes de fissure en surface et à l'interface se stabilisent. En terme d'amplitude, l'ouverture moyenne des fissures créées à l'interface par le pompage est plus faible que l'ouverture moyenne des fissures créées par le séchage en surface de la réparation.

Ces différences de comportement, tant en densité de fissuration qu'en vitesse d'ouverture moyenne de fissure, observées entre la fissuration de surface et la fissuration due au pompage du support peuvent s'expliquer par l'action conjuguée de deux effets. Tout d'abord, en terme de propriétés de diffusion, le matériau de réparation a un coefficient de diffusion plus important que celui du matériau du support (A_{rep}=3.10^{-3} m/s et A_{sup}=2.10^{-3} m/s). Le séchage superficiel en surface est donc plus rapide que le séchage par pompage à l'interface. À cette différence de coefficient de diffusion s'ajoute également une quantité d'eau accessible au séchage ($\Delta C_{surface}$) plus grande pour le matériau de réparation que la quantité d'eau pouvant être pompée à l'interface par le support ($\Delta C_{interface}$) (équations 13 et 14). De plus, avec l'avancement du pompage, l'écart de teneur en

eau entre le support et la réparation diminue conduisant ainsi à un chargement hydrique de moins en mois sévère. En revanche, en surface, le milieu extérieur demeure tout au long du calcul à une humidité relative de 70%. Ces différences de conditions d'échange expliquent en partie pourquoi, au début du séchage et du pompage, la fissuration à l'interface est moins importante que la fissuration de surface.

$$\Delta C_{surface} = C_{ini} - C_{eq} = 138 - 95 = 43 \text{ kg/m}^3 \quad (13)$$

$$\Delta C_{interface} = C_{ini} - C_{eq} = 88 - 53 = 35 \text{ kg/m}^3 \quad (14)$$

Le deuxième effet pouvant expliquer la différence de fissuration entre la surface et l'interface est la différence de rigidité entre les matériaux. La rigidité du matériau d'interface est 24 fois plus petite que celle du matériau de réparation et 50 fois plus petite que celle du support. Les déformations de retrait causées par le pompage du support sur l'interface sont donc moins restreintes que celle causées par le séchage superficiel en surface. Les fissures sont ainsi plus espacées, moins nombreuses et peu profondes car le niveau de contrainte de traction induit pour une même perte de masse est plus faible.

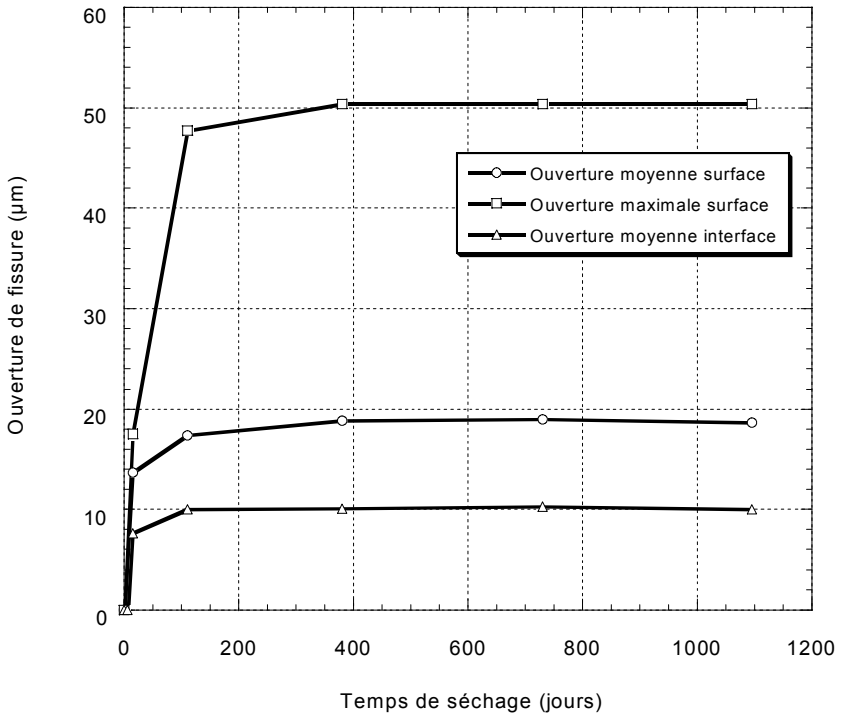


Figure 11.41: Ouvertures moyenne et maximale de fissure en surface de la réparation et à l'interface avec le support (réparation de 50 mm en mortier ordinaire)

- Influence du matériau sur la fissuration due au pompage par le support

Nous venons de voir, pour le mortier ordinaire, dans quelle mesure le pompage par le support de l'eau de la zone d'interface pouvait engendrer de la fissuration. Les rigidités et les coefficients de diffusion des trois matériaux étant différents, il apparaît intéressant de comparer l'influence de la nature du matériau de réparation sur la fissuration due au pompage.

Les figures 11.42 et 11.43 présentent les schémas de fissuration initiale due au pompage pour des réparations de 50 mm d'épaisseur réalisées avec le béton ordinaire et le béton hautes performances (pour le mortier ordinaire se reporter sur la figure 11.38). Globalement le pompage et la fissuration qui en résulte sont très inégaux d'un matériau à un autre. Tout d'abord, il faut remarquer que la fissuration à l'interface est apparue à des temps de séchage différents selon la nature du matériau de réparation. La fissuration à l'interface est apparue après

14 jours dans le cas du mortier ordinaire, après 255 jours dans le cas du béton ordinaire et après 730 jours dans le cas du béton hautes performances.

Ces schémas de fissuration montrent également que la fissuration due au pompage est fortement influencée par la nature du matériau de réparation. En effet, la fissuration à l'interface est beaucoup moins importante dans le cas du béton ordinaire et surtout dans le cas du béton hautes performances pour lequel la fissuration due au pompage est quasi inexistante.

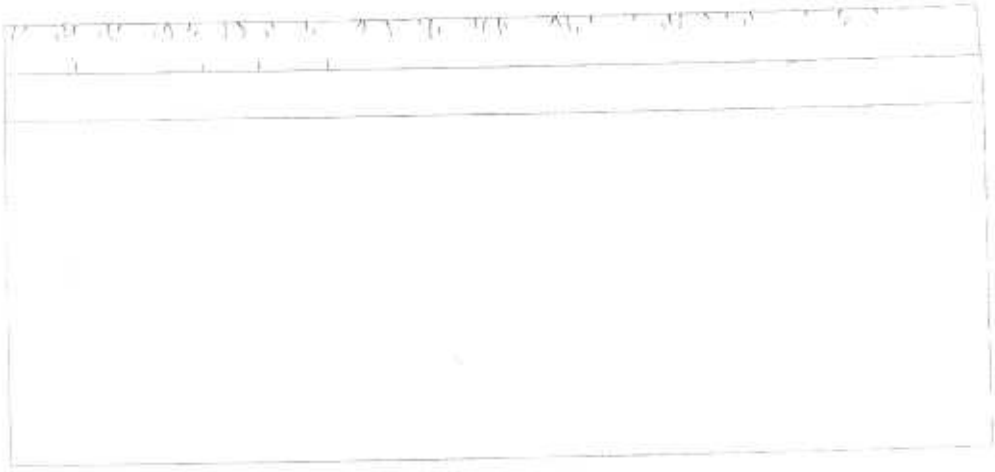


Figure 11.42: Schémas de fissuration initiale due au pompage du béton ordinaire (h=50 mm, t=255 jours)

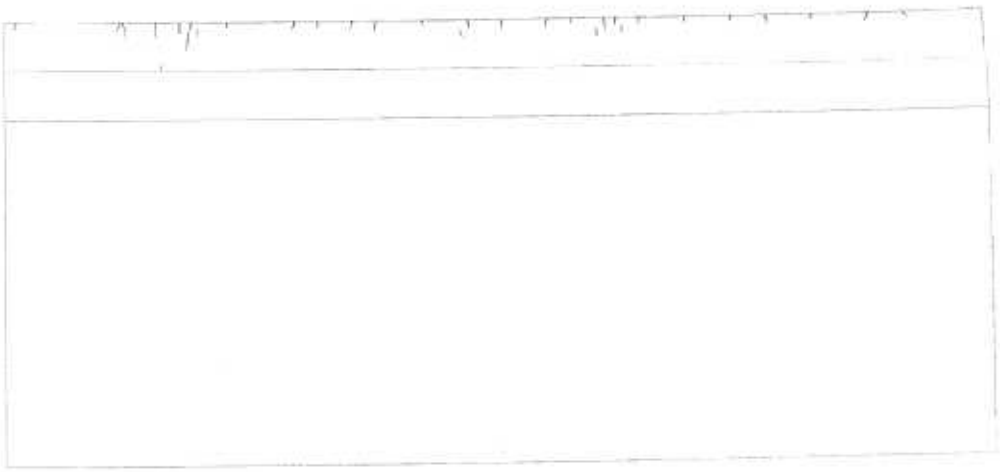


Figure 11.43: Schémas de fissuration initiale due au pompage du béton à hautes performances (h=50 mm, t=730 jours)

La différence de comportement des 3 matériaux de réparation face au pompage du support trouve son explication dans l'action conjuguée des différences de propriétés de diffusion et de propriétés mécaniques. Afin d'analyser ces comportements, revenons sur le mécanisme de pompage de l'eau de la réparation par le support. Le support est au début des calculs supposé en équilibre avec le milieu extérieur. La mise en place d'un matériau de réparation saturé en eau engendre donc un gradient de teneur en eau, force motrice du pompage. Le support va ainsi pomper de l'eau à la réparation jusqu'à l'équilibre des teneurs en eau de part et d'autre de l'interface et dans la limite de 35 kg/m^3, quantité d'eau à partir de laquelle le support se trouve dans un état de saturation. Initialement, le support est à une teneur en eau d'équilibre C_{sup}=53 kg/m3. Compte tenu de la teneur en eau initiale du matériau d'interface $C^{ini}_{interface}$, on peut alors calculer la teneur en eau d'équilibre après pompage $C_{équilibre}$ et ainsi comparer la variation de teneur en eau $\Delta C_{pompage}$ engendrée par le pompage dans la zone d'interface. L'ensemble de ces valeurs est résumé dans le tableau 11.10.

Tableau 11.10: Teneurs en eau initiales, teneurs en eau d'équilibre et variation de teneurs en eau due au pompage dans la zone d'interface

	MO	BO	BHP
$C^{ini}_{interface}$ (kg/m^3)	138	84	66
$C^{ini}_{support}$ (kg/m^3)	53	53	53
$C_{équilibre}$ (kg/m^3)	95	68	59
$\Delta C_{pompage}$ (kg/m^3)	42	15	6

En dehors du fait que ces trois matériaux possèdent des coefficients de diffusion différents, le tableau 11.10 montre que la variation de teneur en eau engendrée par le pompage complet jusqu'à équilibre est différente d'un matériau à un autre. Les variations de teneur en eau engendrées par le pompage dans le cas d'une réparation en béton ordinaire et plus encore dans le cas d'une réparation en

béton hautes performances sont nettement inférieures à celles engendrées dans le cas d'une réparation en mortier ordinaire.

11.8.2 Poursuite du séchage dans le support

Dans l'ensemble des cas étudiés jusqu'à maintenant, aucun décollement n'a été observé à l'interface. En dehors de quelques fissures horizontales dans la zone de régularisation des contraintes à l'extrémité de la demi-poutre, toutes les fissures dues au retrait sont perpendiculaires à l'interface. De plus, étant donné l'hypothèse d'équilibre du support avec le milieu extérieur au moment de la mise en place de la réparation, le séchage du support n'est pas possible. Le support ne se trouve donc jamais sollicité en traction par des contraintes de retrait empêché et les fissures de retrait initiées en surface ne se propagent jamais dans le support lorsqu'elles atteignent l'interface. Afin de vérifier l'influence de cette hypothèse sur la propagation de la fissuration à l'interface, la possibilité a été donnée au support de sécher et donc d'être soumis à des contraintes de retrait empêché. Pour cela, la teneur en eau du support au début des calculs a été fixée, non plus à sa teneur en eau à l'équilibre, mais à sa teneur en eau à saturation. Un coefficient de diffusion et un coefficient de contraction hydrique lui ont également été attribués.

Les cas de séchage se prolongeant dans le support qui ont été étudiés sont celui du mortier ordinaire avec une épaisseur de réparation de 50 mm et ceux du béton ordinaire avec une épaisseur de réparation de 25 mm et de 50 mm.

- Fissuration du support : observations générales

Les figures 11.44 et 11.45 présentent les schémas de fissuration obtenus pour les réparations de 50 mm d'épaisseur en mortier ordinaire et en béton ordinaire. Des fissures sont observées dans la partie supérieure du support seulement pour certains des cas étudiés. Pour le béton ordinaire, aucune fissure ne s'est formée dans le support même après 1095 jours de séchage, soit environ 3 ans. En revanche, dans le cas du mortier ordinaire, des fissures sont observées dans le support à partir de seulement 255 jours, soit environ 9 mois de séchage. Dans le

cas du béton ordinaire, malgré l'absence de fissure dans le support, certaines fissures provenant de la surface ont atteint l'interface et ont développé une ouverture importante.

Dans le cas du mortier ordinaire, les premières fissures apparues dans le support sont des fissures isolées, quasiment fermées, courtes et surtout ne correspondant pas à la propagation de fissures en provenance de la surface et qui se seraient développées dans le support. Dans le cas de ce matériau, après 255 jours de séchage, de nombreuses fissures venant de la surface ont atteint l'interface mais aucune ne se propage dans le support. Avec la poursuite du séchage, d'autres fissures, ayant les mêmes caractéristiques que les premières, se sont développées dans le support. La fissuration est cependant extrêmement faible dans le support comparé à ce qui est observé dans la réparation. Les fissures nouvellement créées ne correspondent toujours pas à la propagation de fissures en provenance de la surface, mais à des fissures isolées. Le fait que les fissures principales de la couche de réparation présentent des ouvertures importantes dans la zone d'interface nous indique cependant que des déformations et des contraintes importantes sont générées dans cette partie du système étudié.

Enfin, aucune fissure horizontale n'a été observée dans la zone d'interface. Cela signifie que le chargement hydrique dû au séchage depuis la surface ne permet pas la création de contraintes de traction qui pourraient provoquer un décollement de la couche de réparation.

- Corrélation entre fissuration et profils de teneur en eau

Les importantes différences de cinétique de séchage engendrent des comportements très différents. Si l'on se réfère aux profils de teneur en eau présentés au chapitre 10, dans le cas du mortier ordinaire, l'interface subit un séchage significatif à partir de 70 jours environ. En revanche, dans le cas du béton ordinaire, un séchage significatif de l'interface est observé seulement à partir de 730 jours. Ainsi, même dans le cadre des réparations minces (50 mm dans notre cas), la cinétique de séchage des matériaux n'est pas suffisamment rapide pour engendrer un séchage significatif de la zone d'interface et de la partie

supérieure du support malgré un temps de séchage final d'environ 3 ans. Cela explique en partie pourquoi la fissuration dans le support semble être un processus difficile à obtenir. Des résultats différents pourraient toutefois être obtenus avec une réparation de 25 mm d'épaisseur, c'est à dire une réparation dont la zone d'interface subirait rapidement un séchage important.

- Cas d'une réparation de 25 mm

Afin de vérifier l'influence de l'épaisseur de réparation sur la propagation de la fissuration dans le support avec la poursuite du séchage au-delà de l'interface, des calculs ont été réalisés avec une réparation en béton ordinaire de 25 mm, cas de figure qui ne présentait aucune fissure dans le support pour une réparation de 50 mm.

Comme le montrent les schémas de fissuration présentés sur la figure 11.46, malgré une fissuration plus rapide et plus importante de la réparation que dans le cas d'une épaisseur de 50 mm, aucune fissure ne s'est propagée ou nouvellement créée dans le support.

Ce comportement semble au départ inattendu, mais s'explique en fait par le comportement mécanique global du système réparation/support. Comme il a été montré au Chapitre 10, dans un tel système, composé de deux matériaux de rigidités différentes, lorsque la réparation est soumise au séchage, des contraintes de traction sont générées dans le matériau de réparation et en réaction, le support est sollicité en compression dans sa partie supérieure (des contraintes de traction sont générées dans la partie inférieure du support de façon à assurer l'équilibre de la section). L'avancement du séchage augmente petit à petit le retrait gêné dans la réparation et en contrepartie les contraintes de compression dans le support augmentent également. Le séchage du support engendre des déformations de retrait, mais celles-ci ne sont pas suffisantes pour compenser les contraintes de compression et le support reste sollicité en compression. Diminuer l'épaisseur de la couche de réparation augmente certes, à un temps donné, l'importance du séchage dans le support, mais à aussi pour effet (comme il a été démontré au paragraphe 11.7.1) d'augmenter l'efficacité du

support en terme de restriction apportée aux déformations de retrait. Une épaisseur de réparation de 25 mm n'est donc pas à priori un cas de chargement plus sévère pour le support dans le sens de la traction.

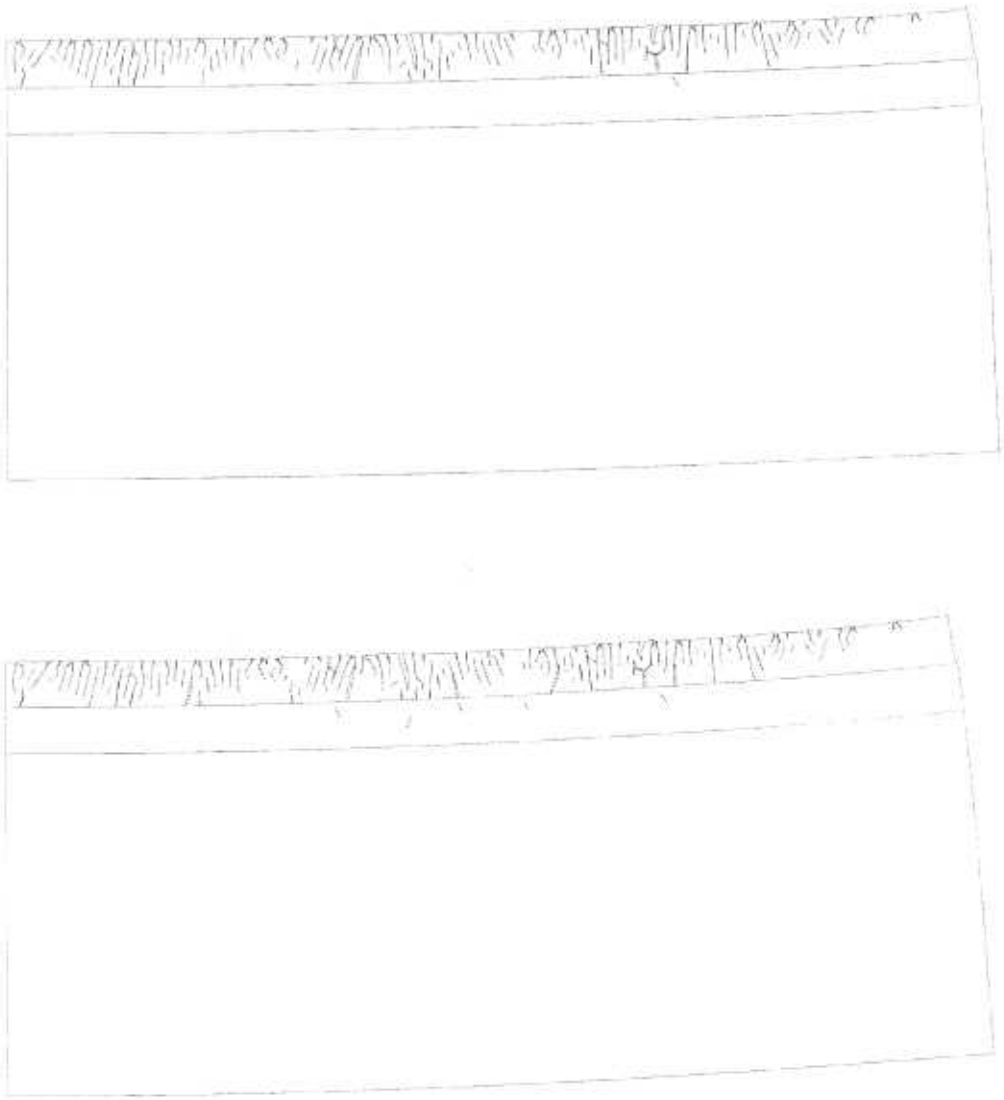


Figure 11.44: Schéma de fissuration d'une réparation de 50 mm en mortier ordinaire avec poursuite du séchage dans le support après 255 et 1095 jours de séchage

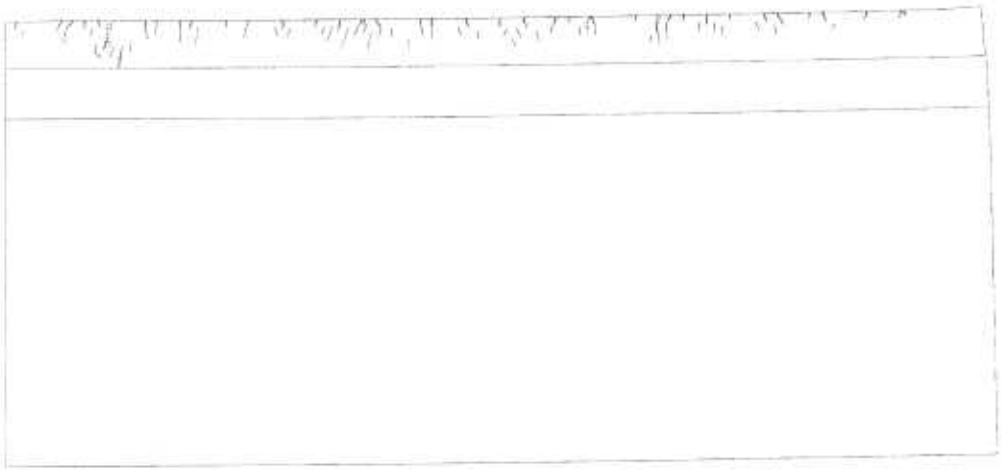


Figure 11.45: Schéma de fissuration d'une réparation de 50 mm en béton ordinaire avec poursuite du séchage dans le support après 1095 jours de séchage

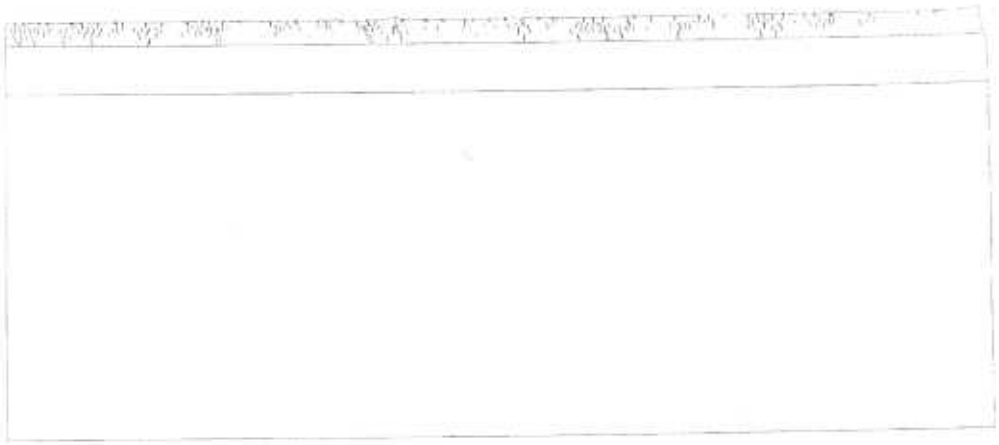


Figure 11.46: Schéma de fissuration d'une réparation de 25 mm en béton ordinaire avec poursuite du séchage dans le support après 1095 jours de séchage

11.8.3 Conclusions

Dans cette partie de l'étude numérique, l'influence des échanges hydriques entre la réparation et le support a été analysée dans l'objectif de mieux comprendre le comportement mécanique du système réparation/support soumis au séchage et le processus de propagation de la fissuration dans la zone d'interface.

Globalement, il a été montré que les échanges hydriques entre la réparation et le support peuvent induire des contraintes de traction dans la zone d'interface,

notamment par un phénomène de pompage de l'eau de la réparation par le support. Toutefois, l'analyse des cas étudiés montre que leur importance est moindre comparativement aux contraintes de traction engendrées en surface de la réparation par le séchage. Les principaux résultats sont les suivants :

- Le pompage de l'eau de la réparation par le support engendre des contraintes de traction dans la zone de la réparation proche de l'interface. Toutefois, cela nécessite un matériau ayant des propriétés de diffusion élevées et qui développe des déformations de retrait importantes pour que des fissures soit générées à l'interface.
- Les fissures générées par le pompage restent perpendiculaires au plan d'interface et ne provoquent pas de décollement de la réparation. De plus, aucune de ces fissures dues au pompage ne s'est propagée dans le support.
- La poursuite du séchage dans le support n'a pas permis le développement de fissures dans le support hormis dans le cas de la réparation de 50 mm en mortier ordinaire pour laquelle quelques fissures courtes et isolées ont été observées dans le support. L'analyse des profils de contraintes montre que le séchage du support n'est pas suffisant pour compenser les contraintes de compression auxquelles est soumis le support.

L'ensemble de ces résultats tend donc à montrer que les échanges hydriques entre la réparation et le support ne sont pas néfastes en ce qui concerne le développement et la propagation de la fissuration due au retrait empêché.

11.9 COMPARAISON DES RESULTATS DES SIMULATIONS AVEC LES MESURES EXPERIMENTALES

Avant de conclure l'étude numérique sur la fissuration des réparations sous chargement hygrométrique, il est intéressant de comparer les résultats des simulations effectuées avec le modèle PROB aux mesures de fissuration réalisées in situ dans le cadre de l'étude expérimentale (cf. Chapitre 8). Dans cet objectif, les ouvertures moyennes et maximales de fissure ainsi que les espacements moyens entre fissures issus des simulations et des mesures in situ ont été comparés. Les résultats sont présentés sur les figures 11.47 à 11.49.

Les résultats montrent que les ouvertures moyennes et maximales de fissure issues des mesures sont plus importantes que celles issues des simulations numériques. La différence est de l'ordre de 50 %. Cependant, l'évolution des ouvertures de fissure est similaire. En effet, les simulations reproduisent bien le comportement en 2 phases du processus de fissuration. Un changement de vitesse dans le développement des ouvertures de fissures est observé après 100 jours dans les 2 cas.

L'analyse des espacements moyens entre fissures (Figure 11.49) montre que les espacements issus des simulations sont plus faibles que ceux issus des mesures. La différence varie selon le matériau considéré. Elle est toutefois moindre que pour les ouvertures de fissure, en particulier dans le cas du mortier ordinaire. Cela signifie que les simulations prédisent une densité de fissuration supérieure à celle mesurée in situ. En outre, les simulations ne montrent pas de différence de comportement significative en terme d'espacement de fissures entre les différents matériaux. Ce résultat n'est pas retrouvé à partir des mesures pour lesquelles des différences importantes sont observées. Toutefois, les simulations reproduisent de façon satisfaisante l'évolution dans le temps des espacement entre fissures. Dans les mesures comme dans les simulations, l'espacement diminue rapidement au cours de la première année, ce qui implique une augmentation importante de la densité de fissuration, et commence à se stabiliser par la suite, ce qui est synonyme de stabilisation du processus de fissuration.

Globalement, les simulations avec le modèle PROB reproduisent bien le processus de développement de la fissuration en terme de cinétique. En revanche, des différences importantes d'amplitude sont observées entre les simulations et les mesures pour les différents paramètres décrivant la fissuration du système.

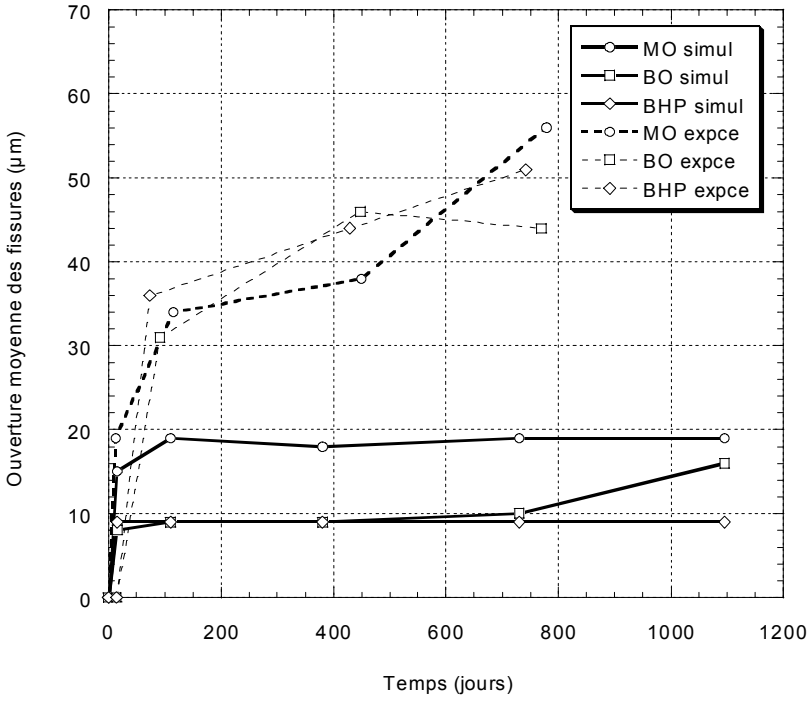


Figure 11.47: Comparaison de l'ouverture moyenne de fissure entre les simulations et les mesures expérimentales in situ – Cas des réparations de 50 mm

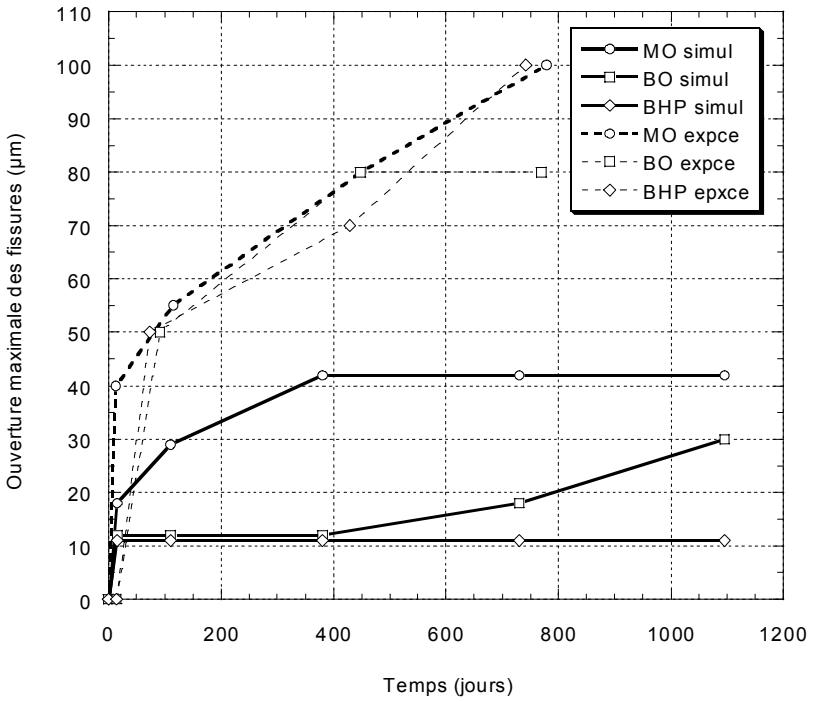


Figure 11.48: Comparaison de l'ouverture maximale de fissure entre les simulations et les mesures expérimentales in situ – Cas des réparations de 50 mm

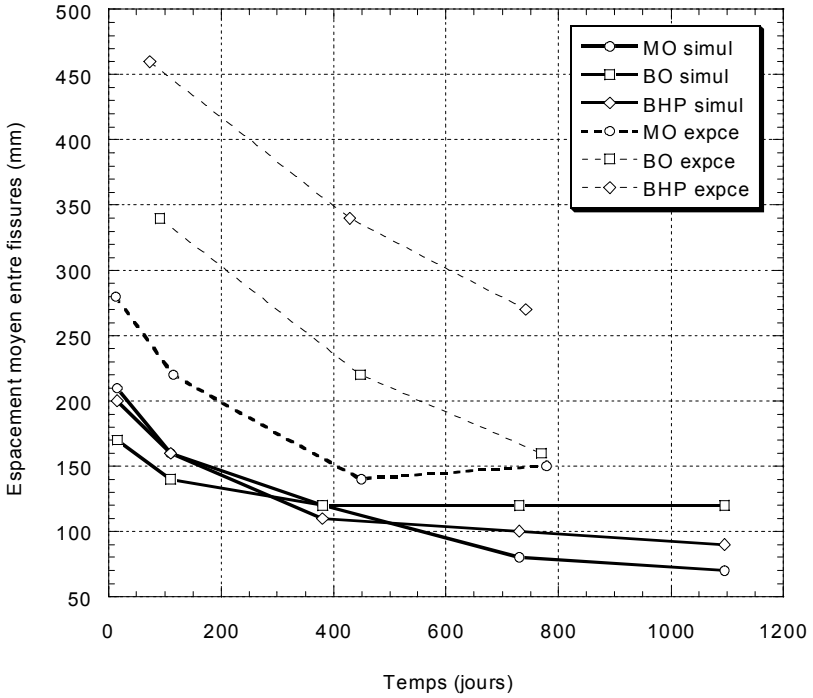


Figure 11.49: Comparaison de l'espacement moyen entre fissures entre les simulations et les mesures expérimentales in situ – Cas des réparations de 50 mm

Les différences entre les simulations et les mesures peuvent avoir plusieurs origines. Tout d'abord, il est important de remarquer que, malgré la précision de l'appareil utilisé pour la mesure des ouvertures de fissure, une erreur de mesure peut provenir des effets de surface qui agissent sur la fissuration. En effet, suite à différents phénomènes physiques (cycles thermiques, cycles de mouillage-séchage, érosion, …) venant agir de façon superficielle sur les fissures, leur ouverture en surface des réparations peut être nettement plus importante que l'ouverture générée par la seule action du retrait empêché. Cela a été en partie confirmé par les observations faites sur répliques qui montrent que l'aspect des fissures et leur ouverture en surface des réparations sont sensiblement différents de ce qui est observé un peu plus en profondeur. Cela signifie que les ouvertures de fissure issues des simulations et des mesures doivent être comparées avec précaution. En revanche ces phénomènes ne devraient pas perturber les espacements entre fissures.

De plus, le chargement hygrométrique et les conditions aux limites utilisés lors des simulations sont différents de ceux auxquels sont soumises in situ les réparations. En effet, les calculs ont été menés en faisant l'hypothèse d'une humidité relative extérieure constante de 70%. Les variations d'humidité et l'absorption d'eau lors des cycles de mouillage-séchage n'a ainsi pas été prise en compte dans les simulations. Or, il est envisageable que ces phénomènes hygrométriques cycliques aient une incidence sur la fissuration du système réparation/support, notamment sur les ouvertures de fissure en surface de la réparation.

Concernant la densité de fissuration plus importante obtenue par les simulations par rapport à celle mesurée in situ, il est important de remarquer que le modèle de séchage utilisé prédit des pertes de masse par diffusion plus importantes que celles mesurées en laboratoire sur les même matériaux dans les mêmes conditions hygrométriques. Cela signifie que le retrait et donc les déformations empêchées sont plus importantes. Le chargement hygrométrique reproduit lors des simulations est donc plus sévère que celui auquel sont soumises les

réparations in situ. Cela peut expliquer en partie la densité de fissuration plus importante obtenue par les simulations numériques.

11.10 CONCLUSIONS

Au travers du Chapitre 11, une modélisation numérique de la fissuration due au séchage dans une réparation mince en béton a été présentée. Cette modélisation a permis de mieux comprendre les mécanismes de fissuration et de propagation de la fissuration d'une réparation en béton subissant des échanges hydriques non seulement en surface avec le milieu extérieur, mais également au travers de l'interface avec le support.

Avant d'en présenter les principaux résultats, il est important de rappeler les hypothèses de la modélisation réalisée dans le cadre de cette étude:

- Le séchage du matériau s'effectue à température constante.
- Les échanges hydriques avec le milieu extérieur se font à humidité relative constante.
- Le matériau de réparation est non vieillissant et ses propriétés mécaniques sont celles développées après 7 jours de mûrissement.
- La relaxation des contraintes par fluage n'est pas prise en compte.
- L'interface entre la réparation et le support est modélisée par une couche d'épaisseur 0,005 m et dont le matériau constitutif a une rigidité fictive de 1 GPa et une résistance en traction fixée à la valeur d'adhérence obtenue en laboratoire après 28 jours de séchage in situ.
- Les propriétés de diffusion du matériau d'interface sont identiques à celles du matériau de réparation.

Les principaux résultats et les principales conclusions auxquelles cette étude de la fissuration des réparations minces sous chargement hydriques a permis d'aboutir peuvent être résumés de la façon suivante :

- Caractéristiques générales de la fissuration

Le séchage constitue un chargement sévère pour le matériau et la structure. Malgré l'absence de charge extérieure, le séchage provoque rapidement la fissuration de la couche de réparation. Les importants gradients de contraintes qui résultent du séchage différentiel du matériau provoquent une fissuration rapide et dont la densité est importante. Les ouvertures des fissures observées sont de l'ordre de 30 à 50 µm pour les fissures principales les plus profondes. Les ouvertures ne sont que de quelques microns à 10 µm pour la majorité des fissures présentes en grand nombre au sein de la couche de réparation.

- Paramètres gouvernant la fissuration

L'épaisseur de réparation est un paramètre qui joue un rôle important sur les caractéristiques de la fissuration due au séchage. Plus l'épaisseur est importante et plus les fissures sont ouvertes et espacées.

Le paramètre qui est apparu le plus déterminant sur la fissuration de la réparation est la nature du matériau dont celle-ci est constituée. Les propriétés mécaniques (rigidité, résistance en traction) ont certes une influence, mais les propriétés qui gouvernent réellement la fissuration et sa propagation sont les propriétés de diffusion du matériau. Un matériau au coefficient de diffusion faible sera un matériau dont le séchage sera lent et donc dont la fissuration, bien qu'inévitable en surface, se propagera peu en profondeur. Si le coefficient de diffusion du matériau de réparation est le paramètre qui détermine la cinétique du séchage et incidemment la vitesse de fissuration, la quantité d'eau accessible au séchage dans le matériau est le paramètre qui détermine l'importance de la fissuration, tant en ouverture de fissure qu'en densité de fissuration. Plus petite sera la quantité d'eau accessible au séchage, plus faible sera le retrait et donc moins importante sera la fissuration qui en résulte. Bien sur, la quantité d'eau accessible au séchage est un paramètre fortement couplé au coefficient de diffusion du matériau. Ces deux paramètres reflètent en fait la microstructure du matériau, en terme de densité et de porosité capillaire, tout comme les propriétés mécaniques telles que la rigidité et la résistance.

- Influence des échanges hydriques sur la fissuration

Les échanges hydriques avec le support sont également source de contraintes importantes pour la réparation dans la zone proche de l'interface. Un pompage excessif de l'eau de la réparation par le support induit rapidement de la fissuration proche de l'interface. Cette fissuration reste cependant beaucoup moins importante que la fissuration de surface et se propage peu dans l'épaisseur de la réparation. Elle n'induit pas non plus de délamination de la réparation.

- Mécanismes de propagation de fissure à l'interface

Lorsque les fissures dues au retrait atteignent l'interface, elles sont dans la grande majorité des cas arrêtées par le support qui se trouve dans un état global de contraintes de compression. Dans certains cas pour lesquels le matériau de réparation a des propriétés de diffusion importantes, des fissures sont initiées dans le support. Mais celles-ci ne correspondent pas à la propagation de fissures provenant de la surface et ne sont pas importantes que ce soit en longueur ou en ouverture. Dans la majorité des cas, même si le séchage se poursuit dans le support, le retrait qu'il y occasionne n'est pas suffisant pour compenser les contraintes de compression auxquelles le support est soumis en réaction au retrait de la réparation.

En dehors des zones de régularisation de contraintes aux extrémités de la poutre, aucune fissure parallèle à l'interface susceptible d'induire un début de délamination n'a été observée, avec les conditions et les matériaux qui ont été testés. Le retrait de séchage empêché n'induit pas de décollement ou de délamination de la réparation. Dans un cadre purement théorique, il semble qu'il soit possible de provoquer des fissures qui se propagent le long de l'interface avec des matériaux de réparation et une interface ayant des rigidités élevées. Mais cela ne correspond pas à une situation réaliste.

PARTIE IV :

SYNTHESE ET CONCLUSIONS

CHAPITRE 12

SYNTHÈSE ET CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce chapitre présente tout d'abord un bref rappel des objectifs de l'étude et de la méthodologie mise en œuvre pour répondre à la problématique posée. Ensuite, les principaux résultats des différentes parties du travail de recherche sont résumés. Ceux-ci permettent alors d'établir quelques recommandations pour la conception de réparations minces en béton soumises à un chargement hydrique. Enfin, ce chapitre se conclut par l'énoncé de quelques perspectives de recherche auxquelles pourrait donner suite ce travail.

12.1 OBJECTIFS ET METHODOLOGIE

Le travail de recherche avait pour objectif global l'étude du comportement mécanique du système réparation/support sous l'action d'un chargement hydrique. Dans ce cadre, l'objectif de fond de la thèse était la validation de l'alternative réparation mince adhérente. Les réparations ciblées dans le cadre de cette étude sont les réparations minces en béton non armé. Cette problématique de départ a soulevé la question principale suivante:

- Le séchage seul peut-il provoquer la fissuration et le décollement des réparations minces en béton ?

La méthodologie mise en œuvre pour répondre à cette question et rencontrer l'objectif global se compose de deux parties complémentaires. La première partie est une étude expérimentale in situ du comportement mécanique et de la fissuration des réparations minces sous l'action d'un chargement hygrométrique réel. Dans cette partie sont abordés la durabilité au séchage de l'adhérence d'une réparation à son support ainsi que l'étude des mécanismes de fissuration et de

propagation des fissures à l'interface réparation/support. La seconde partie est une étude par modélisation numérique du comportement mécanique et de la fissuration des réparations minces en béton soumises au séchage. Celle-ci avait pour objectifs d'étudier le développement de la fissuration due au retrait restreint dans les réparations et plus spécifiquement la propagation des fissures lorsqu'elles atteignent l'interface. L'outil numérique a permis de découpler les phénomènes physico-chimiques mis en jeu afin de mieux en cerner les effets.

12.2 PRINCIPAUX RESULTATS

Cette partie du chapitre résume les principaux résultats obtenus suite à l'étude expérimentale in situ et à l'étude par modélisation numérique.

12.2.1 Comportement hygrométrique des réparations

L'étude expérimentale in situ du comportement hygrométrique des réparations a permis de mettre en évidence les points suivants:

- En conditions climatiques réelles, pour la durée de suivi visée (2 ans), le séchage des réparations demeure superficiel. Il semble exister une épaisseur seuil de séchage au-delà de laquelle le séchage n'est pas significatif. Cette épaisseur seuil dépend de la nature du matériau de réparation et varie entre 10 mm et 30 mm. Le retrait continuant, bien que lentement, à progresser à l'issue des 2 ans, il est probable que les épaisseurs seuil mesurées ne soient celles correspondant à l'équilibre final du système.
- Les cycles de mouillage-séchage s'accompagnent cependant de déformations de retrait importantes (malgré l'action compensatoire de l'absorption d'eau sur le retrait) qui conduisent à la fissuration de la réparation

L'étude par modélisation numérique du séchage des réparations, qui ne prenait pas en compte les cycles d'humidité, a permis de mettre en évidence les faits suivants et de confirmer certains résultats de l'étude expérimentale:

- Avec une humidité relative extérieure de 70%, d'importants gradients de teneur en eau sont générés en surface des réparations et cela dès les premiers jours de séchage.
- Le degré de séchage est fortement dépendant de l'épaisseur de la réparation et de la nature du matériau.
- Les échanges hydriques entre la réparation et son support, tels que le pompage de l'eau du matériau de réparation par le support, sont une source de gradient de teneur en eau supplémentaire non négligeable dans la zone proche de l'interface pouvant conduire à sa fissuration.

12.2.2 Adhérence des réparations

Cette partie de l'étude expérimentale a permis de réaliser les observations suivantes:

- L'adhérence initiale n'est pas sensible à l'épaisseur de la réparation et est très peu sensible à la nature du matériau de réparation.
- Les cycles de mouillage-séchage n'induisent pas de diminution de l'adhérence, même pour les réparations dont l'épaisseur est inférieure ou du même ordre que l'épaisseur seuil de séchage, et cela, quelle que soit la nature du matériau de réparation.
- La fissuration des réparations n'a pas d'influence sur l'adhérence des réparations.

12.2.3 Fissuration des réparations

L'étude expérimentale de la fissuration des réparations par retrait restreint a mis en évidence les résultats suivants:

- Le séchage et le retrait qui en découle génèrent de façon inévitable la fissuration des réparations, au moins en surface.
- Il a été montré qu'une épaisseur importante favorise la création de fissures plus espacées, mais en contrepartie plus ouvertes que dans les réparations de plus faible épaisseur.

- La densité de fissuration est directement reliée au retrait développé par le matériau. Un retrait important conduit en effet à une densité de fissuration plus importante.
- Les fibres d'acier, introduites en volume suffisant, permettent de contrôler la fissuration en favorisant la création d'un réseau de fissures plus nombreuses, discontinues et moins ouvertes que dans les réparations constituées d'une matrice identique et avec la même épaisseur de recouvrement. Le gain de performance vis à vis de la fissuration est, à 1 an, de 55% pour les ouvertures moyennes de fissures, de 69% pour les ouvertures maximales de fissures et de 63% pour la densité linéique de fissuration.
- Les fissures atteignent rapidement l'interface avec le support. La nature du matériau et l'épaisseur de la réparation (du moins dans la gamme 25-75 mm) n'ont pas d'influence significative sur la profondeur de propagation des fissures dans la réparation. En effet, après 1 an, dans les différentes combinaisons épaisseur-matériau testées, excepté dans le cas du mortier fibré, les fissures atteignent la zone d'interface avec le support.
- Une épaisseur de réparation inférieure à l'épaisseur seuil de séchage (dans notre cas, 25 mm) favorise la propagation des fissures dans le support.
- Il n'a été observé aucune fissure se propageant de manière à provoquer le décollement ou la délamination des réparations.

L'étude par simulation numérique a permis de dégager les résultats suivants:

- Le séchage et les gradients de contrainte qu'il génère engendrent rapidement la fissuration des réparations avec une densité de fissuration importante.
- La modélisation numérique confirme l'influence de l'épaisseur comme paramètre gouvernant le processus de fissuration: une épaisseur importante conduit à des fissures plus espacées mais dont les ouvertures sont plus importantes.

- La nature du matériau de réparation conditionne l'importance de la fissuration de séchage. Outre les paramètres du matériau tels que son module d'élasticité ou sa résistance en traction, ce sont surtout sa diffusivité hydrique et sa quantité d'eau libre qui influent sur la fissuration. Ainsi, plus la diffusivité est faible, plus le séchage est lent et moins la fissuration se développe en profondeur dans la réparation. Une quantité d'eau libre importante induit un retrait important et donc une densité de fissuration plus grande.
- Les échanges hydriques entre la réparation et le support favorisent la création de fissures dans la zone d'interface. Ainsi, un pompage excessif de l'eau de la réparation par le support conduit à l'apparition de fissures dans la réparation dans la zone proche de l'interface. Ces fissures sont toutefois moins importantes en nombre et en ouverture que les fissures provenant de la surface.
- Avec les matériaux et les conditions aux limites simulées, le séchage n'a pas conduit à la création de fissure pouvant provoquer le décollement ou la délamination de la réparation, hormis aux extrémités de l'élément réparé sur des distances très peu importantes.

Globalement, les résultats sur la fissuration obtenus par l'étude expérimentale et l'étude numérique montrent que le comportement mécanique du système réparation/support est monolithique et que le séchage ne peut provoquer seul le décollement ou la délamination de la réparation. D'une part, il a été montré que les contraintes de cisaillement à l'interface ne sont pas suffisantes pour générer de la fissuration à l'interface. D'autre part, il a été montré que les fissures de retrait sont soit freinées à l'interface, soit se propagent de façon peu significative dans le support si un séchage suffisamment important intervient au-delà de l'interface. Sur ce point, il semble que la propagation des fissures dans le support, dans les réparations de 25 mm, soit en relation directe avec à la propagation du séchage au-delà de l'interface.

Dans le cadre de l'objectif global de la thèse, un conclusion importante est que dans des conditions de mise en œuvre adéquates et avec des matériaux de

qualité, les réparations minces en béton se comportent bien lorsque soumises au séchage et à des cycles de température et d'humidité relative. Les réparations minces adhérentes en béton constituent donc une alternative tout à fait viable dans plusieurs situations.

12.3 RECOMMANDATIONS POUR LA CONCEPTION DES REPARATIONS

Les résultats obtenus par ce travail de recherche et les éléments de compréhension qui ont pu être dégagés permettent d'établir quelques recommandations pour la conception des réparations minces en béton soumises à un chargement hygrométrique.

12.3.1 Recommandations générales

Pour le concepteur de réparations, deux aspects importants doivent être garantis:

- L'adhérence de la réparation à son support doit être suffisante et surtout durable dans le temps
- La fissuration doit être évitée ou minimisée

Problème de l'adhérence

En ce qui concerne l'adhérence, il a été montré dans ce travail de recherche que la fissuration due au retrait restreint ne provoque ni délamination ni décollement et que le séchage ne tend pas a diminuer la qualité des forces d'adhésion entre les deux matériaux. Le facteur prépondérant pour l'obtention d'une bonne adhérence est donc essentiellement la préparation de surface. Sur ce point, l'étude bibliographique a mis en évidence que, dans le cas d'un chargement hygrométrique ne générant pas de cisaillement important à l'interface, l'obtention d'une bonne adhérence est conditionnée par l'obtention d'une micro rugosité de surface importante qui favorise la création de liens nombreux et résistants entre les deux matériaux[1]. À cet égard, l'utilisation d'une technique telle que l'hydrodémolition ou la combinaison de la démolition mécanique à énergie

[1] La macro rugosité devient importante pour des considérations de blocage mécanique dans le cas d'un chargement sollicitant l'interface par cisaillement.

modérée et d'un jet de sable permet d'obtenir une micro rugosité importante et ainsi une bonne adhérence de la réparation à son support.

Contrôle de la fissuration

Eviter ou minimiser la fissuration est un problème beaucoup plus difficile. La meilleure solution serait pour cela de réduire le plus possible le retrait. Actuellement, en l'absence de matériaux cimentaires sans ou à très faible retrait, la solution réside plutôt dans la diminution des effets du retrait, c'est à dire dans le contrôle de la fissuration que celui-ci génère lorsqu'il est empêché.

Le contrôle de la fissuration peut être obtenu soit en augmentant le potentiel de fluage du matériau de réparation, soit en lui conférant de la ductilité. L'obtention d'un matériau dont le potentiel de fluage est suffisant pour contrer les effets du retrait est difficile dans la mesure où ces deux phénomènes sont fortement corrélés et que l'augmentation de l'un s'accompagne souvent pour les mortiers et bétons classiques de l'augmentation de l'autre. En revanche, développer un matériau présentant une certaine ductilité est réalisable en incorporant des fibres métalliques. Introduites en volume suffisant dans la matrice, des fibres de géométrie adaptée à la granulométrie du matériau ainsi qu'aux dimensions de la réparation, permettent une distribution de la fissuration sous la forme de fissures plus nombreuses, mais beaucoup moins ouvertes. Les fibres permettent ainsi de réduire de façon significative la densité de fissuration de la réparation. À priori, une fissuration diffuse avec des fissures de faible ouverture est moins préjudiciable à la perméabilité du matériau qu'une fissuration localisée avec des fissures moins nombreuses, mais d'ouverture importante. Les fibres rendent de plus le réseau de fissures discontinu. Cela revient à augmenter la tortuosité du réseau de fissures et donc à minimiser l'augmentation de perméabilité apportée par la fissuration. Enfin, pour des raisons d'esthétisme de la réparation, les fibres métalliques ont un effet bénéfique, dans la mesure où les ouvertures de fissure sont dans la gamme des ouvertures à peine perceptibles par l'œil humain.

Pour les réparations de faible épaisseur, l'utilisation d'un mortier est souvent inévitable pour des raisons de granulométrie. Ces matériaux à volume de pâte

important développent un retrait important. L'ajout de fibres d'acier peut permettre de diffuser davantage la fissuration. Pour ce type de problème, il convient également de formuler le mortier de façon à minimiser son retrait total. Pour cela, l'utilisation d'additions minérales en remplacement du ciment, telles que les cendres volantes, les fumées de silice ou encore les fillers calcaires, est une possibilité. En effet, ces additions conduisent à une réduction de la porosité du matériau, ce qui induit une diminution du retrait total. Il faut cependant s'assurer du résultat obtenu par un essai de retrait en laboratoire, car ces produits sont souvent de nature variable et il n'y a pas de règle générale quant à leur effet sur le retrait.

Optimisation de l'épaisseur de réparation

En situation de déformations empêchées, diminuer le retrait total du matériau ou lui conférer de la ductilité constitue toujours un apport pour minimiser la fissuration. Mais, selon la nature et la fonction de la réparation à réaliser, l'épaisseur de la réparation est également un paramètre de conception important puisqu'il conditionne la réponse en fissuration du système (ouverture de fissure et espacement entre fissures).

Dans le cas d'une *réparation superficielle* pour laquelle les aciers de renforcement n'ont pas été dégagés, une réparation de faible épaisseur (de l'ordre de 20 à 30 mm) peut, dans certains cas, être mieux adaptée qu'une réparation d'épaisseur importante (supérieure à 75 mm). En effet, la faible épaisseur va permettre une meilleure distribution des fissures sous la forme d'un nombre de fissures certes plus important, mais dont les ouvertures seront suffisamment petites pour ne pas causer une augmentation significative de la perméabilité du recouvrement. Une épaisseur de réparation importante va au contraire favoriser la création de fissures de plus grande ouverture qui ont pour conséquence d'augmenter considérablement la perméabilité de la réparation. La couche de réparation aura alors un rôle amoindri de protection vis à vis du transport des espèces ioniques agressives. En contrepartie, une épaisseur de l'ordre de 20 à 30 mm diminue le temps de transport par diffusion (selon un facteur égal au carré du rapport des épaisseurs) des espèces ioniques agressives dans le matériau sain. L'effet de la

fissuration sur le transport des ions reste donc à confirmer par des mesures de perméabilité sur matériau fissuré. Enfin, l'épaisseur de réparation choisie doit également être au moins égale à l'épaisseur seuil de séchage afin de ne pas favoriser la pénétration des fissures de retrait dans le support.

Dans le cas d'une *réparation structurale* pour laquelle le principal objectif est de restituer la capacité portante initiale de l'élément considéré, l'épaisseur de la réparation sera alors dictée par les lois de la résistance des matériaux et de la mécanique. Toutefois, pour des épaisseurs de réparation relativement importantes (de l'ordre de 200 à 400 mm), il est souhaitable d'employer un matériau ayant un potentiel de fluage important ou du moins une bonne capacité d'adaptation de façon à éviter la propagation des fissures en profondeur et donc pour éviter l'augmentation importante de l'ouverture des fissures qui en résulte puisque ces deux paramètres sont directement corrélés. En effet, alors que pour les réparations de faible épaisseur la restriction des déformations et les gradients de contraintes sont tels que le rôle du fluage sur le contrôle de la fissuration apparaît tout à fait négligeable, il est possible que pour les réparations de forte épaisseur la relaxation par fluage puisse agir de façon significative, en particulier sur la profondeur de propagation des fissures.

12.3.2 Exemples de cas pratiques de réparations

À partir de ces quelques recommandations et considérations générales sur la conception des réparations, il est intéressant d'aborder quelques cas de réhabilitation d'ouvrage en béton qui peuvent être rencontrés dans la pratique.

Cas des trottoirs en béton

Les trottoirs sont des éléments non armés et ne subissant pas un chargement mécanique important. Le principal problème est leur durabilité, en particuliers leur résistance au gel/dégel et surtout à l'écaillage en présence de sels fondants. La réparation d'un trottoir peut donc être réalisée sur une faible épaisseur, de l'ordre de 20 à 30 mm. En effet, un telle épaisseur permettra de diffuser la fissuration potentielle de retrait sous la forme de fissures très faiblement ouvertes

et ne sera pas néfaste à l'adhérence avec le support puisque le comportement de tels systèmes composites réparation/support est, pour de telles épaisseurs de recouvrement, monolithique en situation de chargement hygrothermique. Il est toutefois important de veiller à minimiser le retrait par une formulation optimisée du matériau. Il est également souhaitable d'incorporer des fibres d'acier (typiquement 1% en volume de fibres à crochet de longueur au moins 3 fois supérieure à la dimension maximale des granulats), car elles permettront de contrôler très efficacement la fissuration de retrait en la diffusant, ce qui aura pour conséquence principale de réduire les ouvertures de fissures déjà minimisées par le choix d'une épaisseur de recouvrement faible.

En terme de choix de matériau, si l'on se réfère aux matériaux utilisés dans ce projet de recherche, un matériau du type « Mortier Ordinaire» de rapport Eau/Ciment=0,40 formulé avec un agent entraîneur d'air et 1% en volume de fibre d'acier 30/.50 à crochets serait adapté à ce genre d'application. En effet, ce matériau est conçu pour être durable au gel/dégel et à l'écaillage et peut, compte tenu de sa granulométrie, s'appliquer suivant de faibles épaisseurs. Les fibres permettront de limiter très efficacement l'ouverture des fissures générées par le retrait empêché qui reste relativement important pour les mortiers.

Cas des dallages industriels

Les dallages industriels sont des éléments subissant un chargement mécanique important. Ils sont donc fortement armés. Le principal problème qui se pose lors d'une intervention de réhabilitation sur ce type d'éléments est davantage la capacité portante que la durabilité même si cet aspect ne doit pas être négligé notamment en extérieur. L'épaisseur de la réparation sera donc fixée par le dimensionnement vis à vis des charges de service. Toutefois, il est souhaitable d'optimiser l'épaisseur pour éviter tout problème de décollement qui est susceptible de se produire avec les épaisseurs de réparation importantes (le lecteur pourra se reporter aux travaux de Bernard (Bernard, 2000) sur les réparations d'épaisseur importante et chargées mécaniquement). Il convient également d'employer un matériau ayant une bonne capacité d'adaptation par fluage, c'est à dire un coefficient fluage/retrait élevé, pour permettre aux

phénomènes viscoélastiques de limiter le développement de la fissuration en profondeur.

Pour ce type d'application où les propriétés mécaniques revêtent de l'importance, il est intéressant d'employer un matériau « hautes performances» comme le Béton Hautes Performances utilisé dans ce projet, de rapport Eau/Ciment=0,30 avec 8% de fumée de silice en poids de ciment. Avec une résistance et un module élevés, ce matériau permettra de réduire l'épaisseur de la réparation à moment de flexion résistant égal, par rapport à une solution mettant en œuvre un béton ordinaire. Il faudra toutefois veiller à minimiser le retrait endogène qui peut générer de la fissuration au jeune âge en appliquant une cure à l'eau précoce sur une durée suffisamment longue pour réduire l'autodessiccation.

Cas des poteaux et des colonnes

Les poteaux ou colonnes en béton sont des éléments subissant un chargement mécanique important. Une intervention de réhabilitation sera donc soumise, en terme d'épaisseur, à la restitution de la capacité portante minimale requise vis à vis des charges de service. Toutefois, un problème particulier se pose pour ce type d'élément lorsque la réparation n'est pas réalisée de façon axisymétrique sur la circonférence du poteau. En effet, le retrait empêché du matériau de réparation peut induire des déformations de flexion qui, si elles sont excessives, peuvent modifier l'équilibre mécanique du poteau en déplaçant l'axe neutre.

Pour ce type de réparation, il est donc important de minimiser le retrait du matériau en le formulant adéquatement et également de minimiser l'épaisseur de recouvrement pour réduire l'action mécanique du retrait sur le poteau. Une faible épaisseur va en effet permettre une propagation rapide des fissures jusqu'à l'interface avec le support et ainsi permettre le relâchement rapide des contraintes de retrait empêché, sans toutefois que les ouvertures de fissure soit trop importantes pour les problèmes de durabilité et de qualité esthétique. Sur ce dernier point, l'ajout de fibres d'acier aura un effet positif significatif si les fibres sont introduites en volume suffisant et choisies de géométrie appropriée. Elle ne

n'empêcheront pas la fissuration nécessaire au relâchement des contraintes mais permettront de réduire considérablement l'ouverture des fissures.

Pour ce type d'application, si une épaisseur de réparation importante est nécessaire pour des problèmes de capacité portante, alors le choix du matériau devra s'orienter vers un Béton Ordinaire du type de celui utilisé dans le projet de recherche. Avec un rapport Eau/Ciment=0,40 et un agent entraîneur d'air il sera durable au gel/dégel et les déformations de retrait total développé par ce matériau seront suffisamment faibles pour que la fissuration de retrait empêché soit peut importante. En revanche, si une réparation de faible épaisseur est envisageable, alors une solution avec le Mortier Ordinaire à rapport Eau/Ciment=0,40 avec 1% en volume de fibres d'acier serait intéressante, car une fissuration rapide (permettant une relaxation des contraintes de retrait empêché) sera générée sans toutefois que les ouvertures des fissures soient importantes du fait de la faible épaisseur de recouvrement et de la présence des fibres d'acier.

12.4 PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Ce travail de recherche a permis de mieux comprendre les phénomènes qui agissent sur la fissuration des réparations minces en béton en situation de retrait restreint. Il a également permis de cerner les principaux paramètres qui influencent et qui gouvernent le développement de la fissuration. Certaines questions relatives au comportement des réparations sous chargement hygrométrique restent cependant en suspens:

- L'effet réel du fluage sur la fissuration, en particulier vis à vis l'épaisseur de la réparation. Une modélisation numérique du comportement mécanique des réparations ne favorisant pas la relaxation des contraintes par fluage ou par fissuration serait une méthode envisageable pour répondre à cette question.
- L'existence et la quantification de l'épaisseur seuil de séchage indépendamment de l'échelle de temps considérée. Des mesures hygrométriques fines sur des réparations in situ, couplées à une

modélisation numérique permettant la prise en compte des variations d'humidité relative et surtout des cycles de mouillage-séchage, devraient permettre de répondre à cette question.

Nous en sommes maintenant au stade où il est important de développer d'une part des matériaux qui s'adaptent spécifiquement à la problématique des réparations et, d'autre part, de fournir aux ingénieurs et aux maîtres d'ouvrage des règles et des outils de conception des réparations. Cette section passe ainsi en revue quelques perspectives de recherche et de développement dans ce domaine.

Il a été montré que le séchage et le retrait ne sont pas suffisant pour provoquer le décollement et la délamination des réparations minces en béton. Qu'en est-il lorsque le chargement hydrique est couplé à un chargement mécanique? L'état de contrainte et la fissuration induits par le retrait, couplé à un chargement mécanique, pourraient en effet conduire au décollement de la réparation. Le chargement mécanique pourrait être un chargement statique, de fluage ou encore cyclique. Il serait également nécessaire d'étendre les recherches au cadre des réparations structurales d'épaisseur plus importante et pour lesquelles le renforcement en acier est dégagé. Deux thèses de doctorat portant sur ces sujets sont actuellement en cours à l'Université Laval à Québec.

L'utilisation de matériaux cimentaires "classiques" pour la réalisation de réparations ne permet pas d'éviter la fissuration de retrait empêché. Il serait donc intéressant de développer des matériaux sans ou à faible retrait qui permettent de minimiser la fissuration. Plusieurs possibilités existent pour élaborer de tels matériaux dont voici une liste non exhaustive :

- L'utilisation d'un adjuvant réducteur de retrait
- L'utilisation d'un ciment expansif
- L'incorporation dans la matrice de granulats poreux saturés agissant comme source interne d'humidité
- L'utilisation de polymères superabsorbants

Dernièrement de nouveaux bétons aux performances mécaniques exceptionnelles, appelés Bétons Fibrés Ultra Performants, ont été développés. Ces nouveaux composites cimentaires possèdent une résistance en traction de l'ordre de 20 à 30 MPa et un fort caractère écrouissant qui leur confèrent une importante capacité à contrôler la fissuration avant sa localisation sous la forme d'une ou plusieurs macrofissures. Dans le cadre des réparations minces d'épaisseur inférieure à 50 mm, ce type de matériau pourrait avoir un intérêt tout particulier. En effet, malgré un dosage en ciment très important et donc un fort retrait endogène, leurs performances mécaniques en traction et leur très faible sensibilité au séchage permettraient d'éviter, en situation de retrait empêché, l'apparition de fissures préjudiciables pour la durabilité. Certaines propriétés de ces nouveaux matériaux cimentaires ultra performants, en particulier leur comportement volumétrique, devront être étudiées pour de telles applications. De plus, étant donné le coût élevé de ces matériaux, des études permettant d'établir le rapport coût/performance devront être réalisées selon les applications visées.

Outre le développement de matériaux adaptés à la problématique spécifique des réparations, il apparaît maintenant important de fournir aux ingénieurs des règles et des outils de conception des réparations. Dans ce domaine, il a été montré qu'un modèle probabiliste de fissuration permettait de bien rendre compte de la fissuration de retrait empêché et permettait d'accéder aux valeurs des paramètres de fissuration. Ce type de modèle pourrait être utilisé pour établir des abaques et/ou des formules réglementaires fournissant aux concepteurs de réparations la valeur des paramètres de fissuration en fonction de la configuration de la réparation (dimensions géométriques, degré de restriction des déformations) et des propriétés du matériau de réparation (retrait, résistance en traction, module d'élasticité, fluage). Dans cet objectif, avec le modèle de fissuration probabiliste RPDC, il faudrait auparavant pouvoir modéliser l'interface entre la réparation et son support sans avoir recours à un matériau fictif pour la représenter, tout en lui donnant un caractère fissurant. L'ensemble de ces données pourrait aussi prendre la forme d'un logiciel d'aide à la maintenance et aux réparations des ouvrages de génie civil.

BIBLIOGRAPHIE

Abiar, G., (1986), "Cinétique de dessiccation et déformations différées du béton (analyse et modélisation", Thèse de doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris

Acker, P., (1988), "Comportement mécanique du béton: apport de l'approche physico-chimique", Thèse de doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées (1987) et Rapport de recherche LPC, n°152

Acker, P., (1988), "Les effets mécaniques du retrait du béton", Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Spécial XV

Baroghel-Bouny, V., Godin, J., (1998), "Nouvelle approche expérimentale du retrait de dessiccation des pâtes et des bétons durcis ordinaires et à très hautes performances", Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées, n°218

Bazant, Z.P., (1972), "Thermodynamics of hindered adsorption and its implications for hardened cement paste and concrete", *Cement and Concrete Research*, vol. 2, n°1, pp. 1-16

Bazant, Z.P., (1982), "Mathematical models for creep and shrinkage in concrete", Creep and shrinkage in concrete structures, J. Wiley and Sons, Chichester, UK

Bazant, Z.P., Haugaard, A.B., Baweja, S., Ulm, F-J., (1997), "Microprestress-solidification theory for concrete creep. I. Aging and drying effects", *Journal of engineering mechanics*, ASCE, vol. 11, vol. 11, n°123, pp. 1188-1194

Bernard, O., Mivelaz, P., Brühwiler, E., (1998), "Comportement à long terme d'éléments de structures formes de bétons d'âge différent", Association universitaire de génie civil, XVIème rencontres: les ouvrages dans leur environnement; Reims, France

Bernard, O., (2000), "Comportement à long terme des éléments de structure formés de bétons d'âges", École polytechnique fédérale, Lausanne, Thèse EPFL No 2283, 2000, 189p

Bissonette, B., (1996), "Le fluage en traction : un aspect important de la problématique des réparations minces en béton", Thèse de doctorat de l'Université Laval, Québec, Canada, 290 p.

Bissonette, B., Pigeon, M., (2000), "Le comportement viscoélastique du béton en traction et la compatibilité déformationnelle des réparations", *Materials and Structures*, vol. 33, pp. 109-118

Buil, M., (1979), "Contribution à l'étude du retrait de la pâte de ciment durcissante", Rapport de recherche LCPC, n°92

Byfors, J., (1980), "Plain concrete at early ages", CBI research report, F3:80, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, Sweden

Coussy, O., (1995), "Mechanics of porous continua", J. Wiley and Sons, Chichester, UK

Coussy, O., Eymard, R., Lassabatère, T., (1998), "Constitutive modeling of unsaturated drying deformable materials", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, vol. 124, n°6, pp.658-667

Daian, J.F.,(1988), "Condensation and isothermal water transfer in cement mortar. Part I – Pore size distribution, equilibrium water condensation and imbibition", *Transport in porous media*, vol. 3, pp. 563-589

Day, R.L., Gamble B.R., (1983), "The effect of changes in structure on the activation energy for the creep of concrete", *Cement and Concrete Research*, vol. 13, pp.529-540

Dénarié, E., (2000), "Etude expérimentale des couplages viscoélasticité-croissance des fissures dans les bétons de ciment", Thèse de doctorat, École polytechnique fédérale, Lausanne, Thèse EPFL No 2195, 244p.

Emmons, P.H., Vaysburd, A.M., (1995), "Factors affecting the durability of concrete repair : the contractor's viewpoint", *Construction and building materials*, vol. 8, n°1, pp. 5-16

Grandet, J., (1971), "Contribution à l'étude de la liaison entre la pâte de ciment Portland et les terres cuites", Thèse de doctorat de l'Institut Nationale des Sciences Appliquées, Toulouse, France

Granjer, L., (1994), "Comportement différé du béton dans les enceintes de centrales nucléaires : Analyse et modélisation", Thèse de doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris

Granjer, L., Torrenti, J.-M., Acker, P., (1997), "Thoughts about drying shrinkage: experimental results and quantification of structural drying creep", *Materials and Structures*, vol. 30, n°196, pp. 96-105

Guénot-Delahaie, I., (1996), "Contribution à l'analyse physique et à la modélisation du fluage propre du béton", Thèse de doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris

Hansen, W., (1987), "Drying shrinkage mechanisms in Portland cement paste", *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 70, n°5, pp. 323-328

Hua, C., (1992), "Analyses et modélisations du retrait d'autodessiccation de la pâte de ciment durcissante", Thèse de doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris

Hua, C., (1995), "Retrait d'autodessiccation du ciment. Analyse et modélisation macroscopique", Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, n°196 , pp. 79-89

Igarashi, S., Bentur, A., Kovler, K., (1999), "Stresses and creep relaxation induced in restrained autogenous shrinkage of high-strength pastes and concretes", Advanced in Cement Research, vol. 11, n°4, pp. 169-177

Kabele, P., Takeuchi, S.,Inaba, K., Horii, H., (1999), "Performance of engineered cementititous composites in repair and retrofit: analytical estimates", Proceedings of the International RILEM Conference, Mainz, Germany, edited by H.W. Reinhardt and A.E. Naaman

Khelidj, A., Loukili, A., Bastian, G., (1998), "Étude expérimentale du couplage hydro-chimique dans les béton en cours de maturation : incidence sur les retraits", *Materials and Structures*, vol. 31, pp. 588-594

Laplante, P., (1993), "Propriétés mécaniques des béton durcissants: analyse comparée des bétons classiques et à très hautes performances", Thèse de doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Rapport de recherche LPC OA13, Laboratoires des Ponts et Chaussées, Paris

Le Chatelier, H., (1900), "Sur les changements de volume qui accompagnent le durcissement des ciments", Bull. de la Société pour l'Encouragement de l'Industrie Nationale, 5ème série, tome 5, p. 54-57

Le Roy, R., (1996), "Déformations instantanées et différées des bétons à hautes performances", Études et recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées, OA22, Laboratoire central des Ponts et Chaussées, Paris

Mensi, R., Acker, P., Attolou, A., (1988), "Séchage du béton : analyse et modélisation", *Materials and Structures*, vol. 21, pp. 5-12

Mullick, A.K., (1972), "Effects of stress history on the microstructure and creep properties of maturing concrete, Doctoral thesis of the University of Calgary

Paillère A.M., Buil, M., Serrano, J.J., (1987), "Durabilité du béton à très hautes performances : incidence du retrait d'hydratation sur la fissuration au jeune âge", Durability of Construction Materials, RILEM, Compte rendu de conférence, Versailles, Edité par Chapman and Hall

Pigeon, M., Saucier, F., (1992), "Durability of repaired concrete structures", Advanced in Concrete Technology (édité par V.M. Malhotra), Compte rendu de conférence, Athènes, pp. 741-773

Powers, T.C., (1968), "The therdonynamic of volume change and creep", *Materials and Structures*, vol. 1, n°6, pp. 487-507

Rossi, P., Acker, P., (1998), "A new approach to the basic creep and relaxation of concrete", *Cement and Concrete Research*, vol. 18, n°5, pp. 799-803

Rossi, P., Wu, X., (1992), "Probabilistic model for material behaviour analysis and apraisement of concrete structures", *Magazine of Concrete Research*, vol. 44, n°116, pp. 271-280

Rossi, P., Ulm, F.-J., Hachi, F., (1996), "Compressive behaviour of concrete: physical mechanisms and modeling", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, vol. 122, n°11, pp. 1038-1043

Sadouki, H., van Mier, J.M.G., (1997), "Simulation of hygral crack growth in concrete repair systems", *Materials and Structures*, vol. 30, n°203

Sakata, H., K., (1983), "A study on moisture diffusion in drying and drying shrinkage of concrete", *Cement and Concrete Research*, vol. 13, pp. 216-224

Saucier, F., (1990), "La durabilité de l'adhérence des réparations en béton", Thèse de doctorat de l'Université Laval, Québec, Canada, 145 p.

Saucier, F., (1991), "Durability of new-to-old concrete bondings", Evaluation and rehabilitation of concrete structures and innovation in design (édité par V. M. Malhotra), ACI SP 128-43, Hong-Kong, pp. 689-705

Sierra, R., (1980), "Répartition des différentes formes d'eau dans la structure des pâtes pures de C_3S et de ciment Portland", 7ème Congrès international sur la chimie des ciments, Paris, France, vol. 3, thème VI, pp. VI/201-VI/206

Silfwerbrand, J., (1985), "Thin concrete inlays on old concrete roads", Concrete pavment design and rehabilitation, vol. 2, pp. 255-260

Talbot, C., Pigeon, M., Beaupré, D., Morgan, D.R., (1995), "Influence of surface preparation on long term bonding of shotcrete", ACI *Material Journal*, vol. 91, n°6

Ulm, F-J., Coussy, O., (1995), "Modelling of thermonechanical couplings of concrete at early ages", ", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, vol. 121, n°7, pp. 785-794

Ulm, F-J., Coussy, O., (1996), "Strength growth as a chemo-plastic hardening im early age concrete", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, vol. 122, n°12, pp. 1123-1132

Ulm, F-J., Le Maou, F., Boulay, C., (1998), "Creep and shrinkage coupling : new review of some evidence", Revue française de génie civil, vol. 3, n°3,4

Ulm, F-J., Rossi, P., Schaller, I., (1999), "Durability scaling of cracking in HPC structures subject to hygrothermal gradients", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, vol. 125, n°6, pp. 693-702

Verbeck, G.J., Helmut, R.H., (1968), "Structures and physical properties of cement paste", Proceedings of the 5th International Symposium on the Chemistry of Cement, Tokyo

Wittmann, F.H., (1968), "Surface tension, shrinkage and strength of hardened cement paste", *Materials and structures*, vol. 1, n°6, pp. 1-12

Wittmann, F.H., (1993), "Creep and shrinkage mechanisms" in "Creep and shrinkage in concrete structures", Edité par Z.P. Bazant et F.H. Wittmann (J. Wiley and Sons, New-York)

Wu, X., (1991), "Modélisation numérique de la fissuration du béton à partir d'une approche probabiliste", Thèse de doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 118 p.

Xi, Y., Bazant, Z.P., Molina, L, Jennings, H.M., (1994), "Moisture diffusion in cementitious materials. Moisture capacity and diffusivity", *Advanced cement based materials*, vol. 1, pp. 258-266

ANNEXE 1 : RESULTATS DES ESSAIS DE FLUAGE EN TRACTION

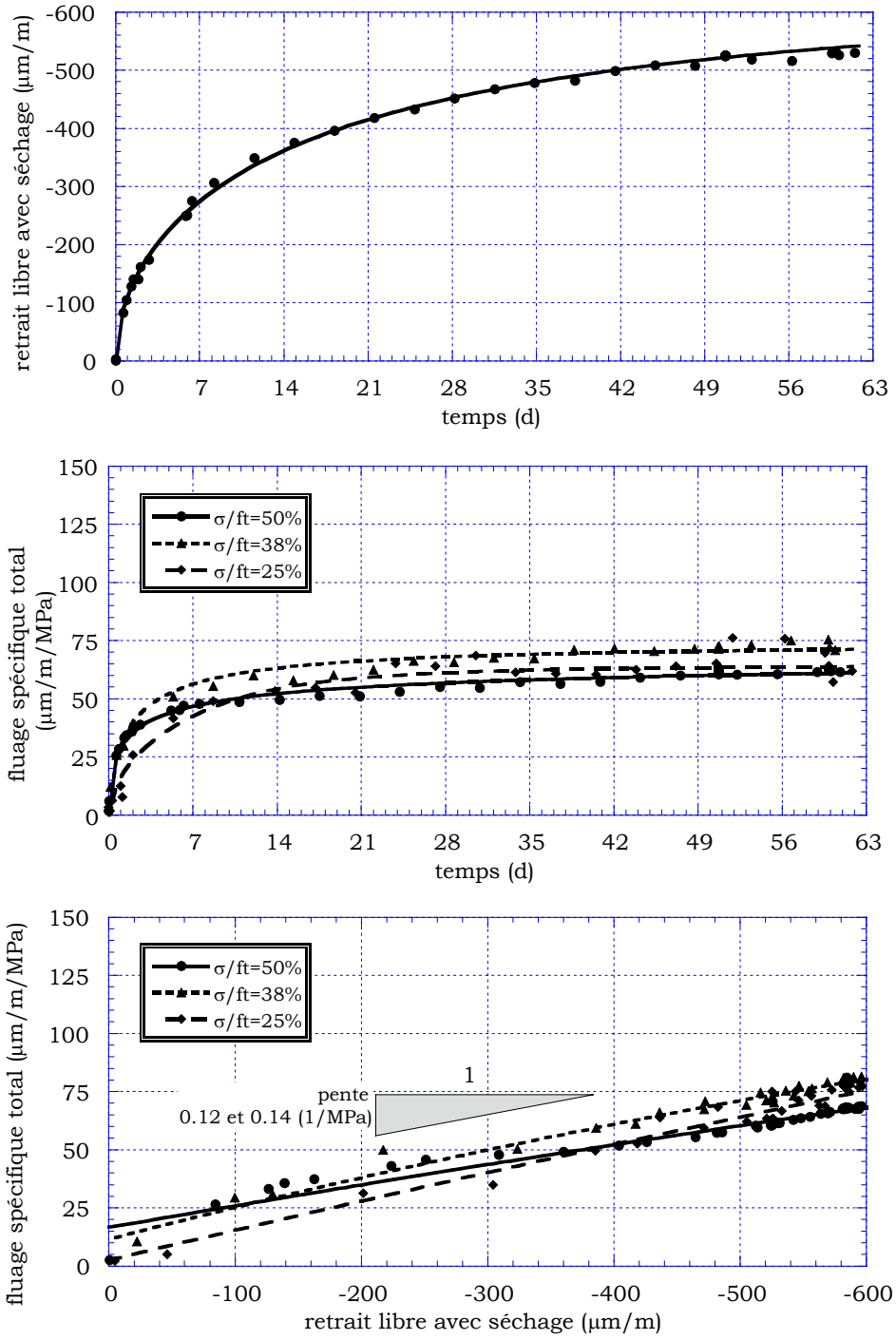


Figure 1 : Bilan des déformations de retrait libre et de fluage spécifique du Béton Ordinaire en conditions d'échange hydrique (H.R.=50%, T=23°C)

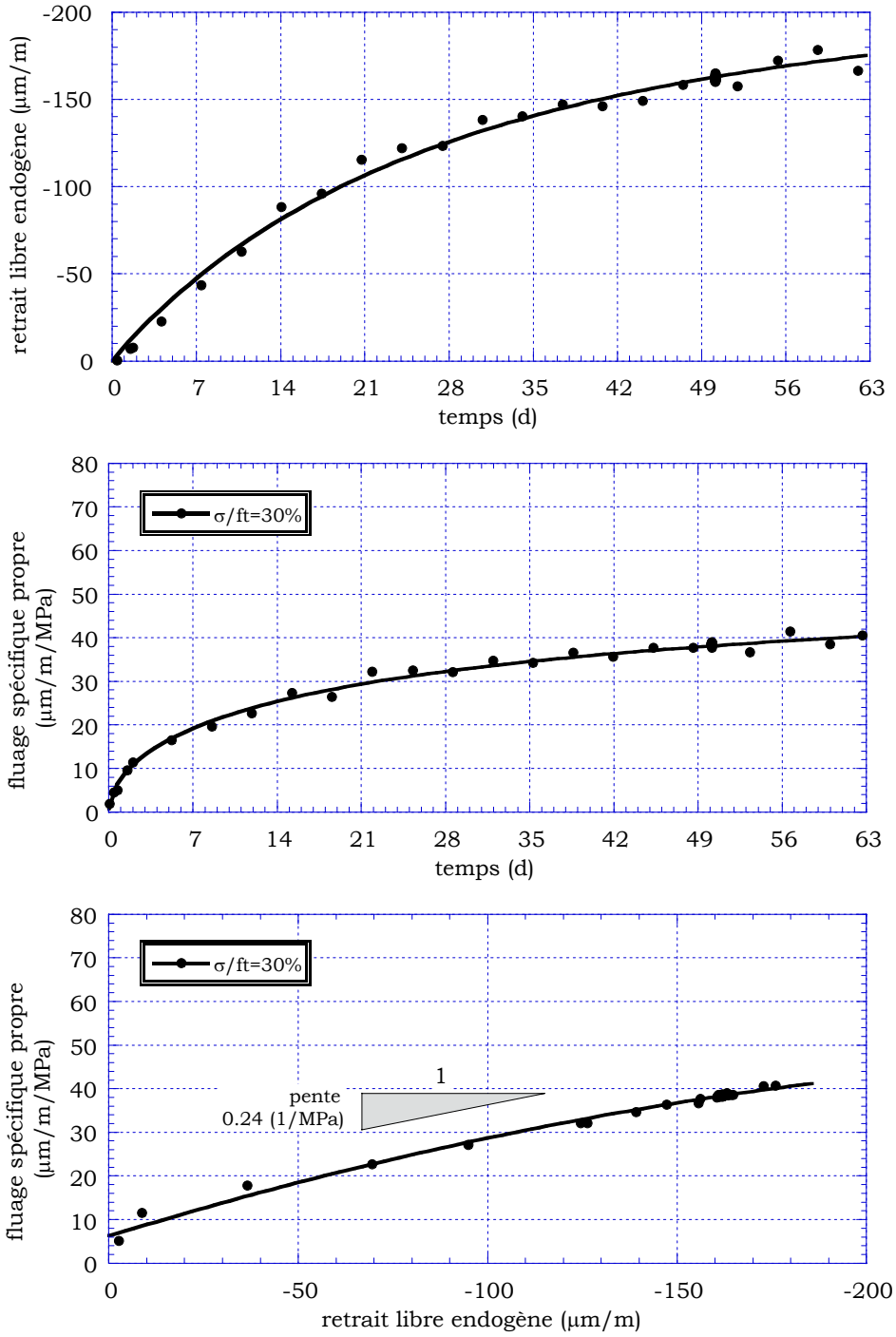


Figure 2 : Bilan des déformations de retrait libre et de fluage spécifique du Béton Ordinaire en conditions endogène (T=23°C)

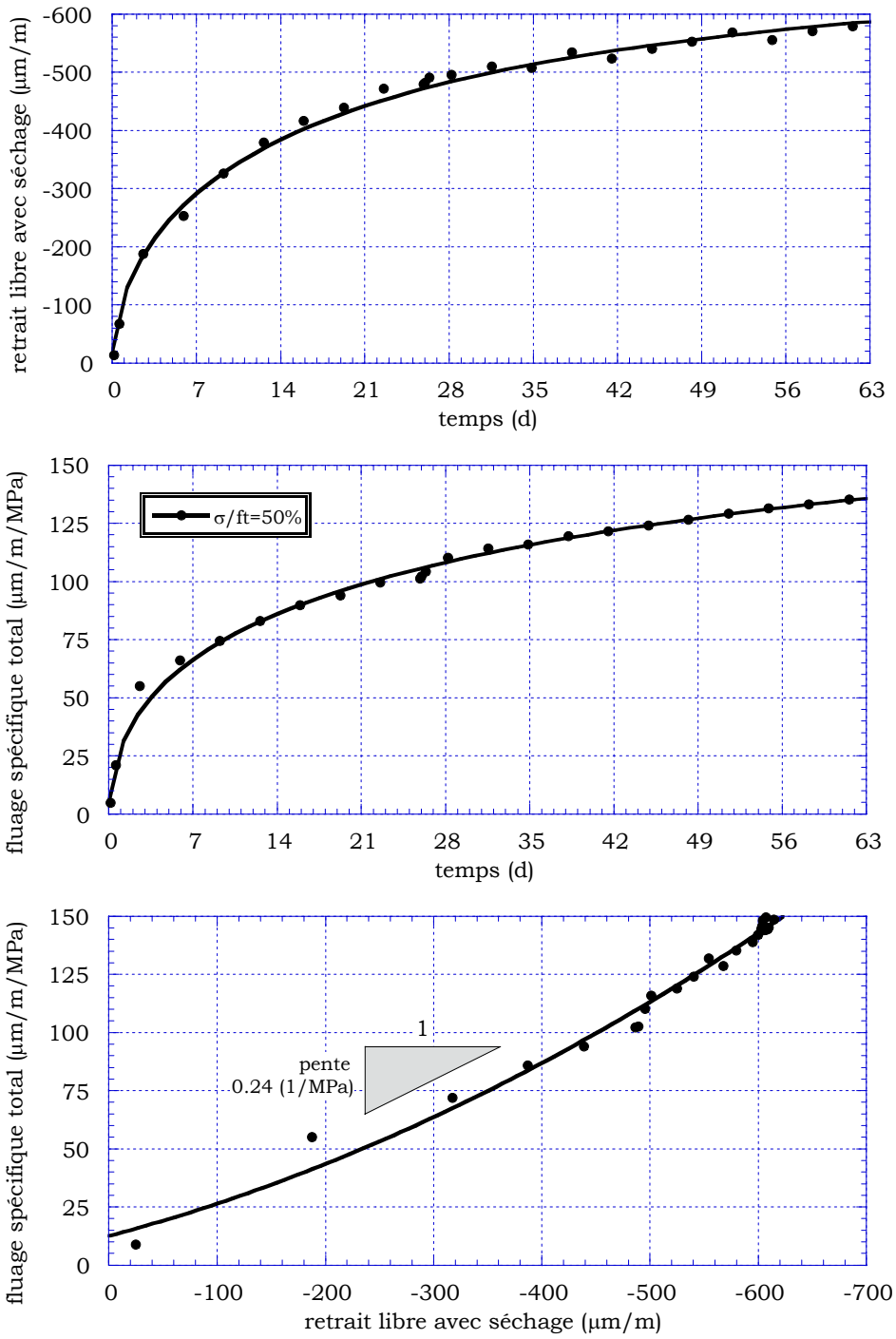


Figure 3 : Bilan des déformations de retrait libre et de fluage spécifique du Béton Hautes Performances en conditions d'échange hydrique (H.R.=50%, T=23°C)

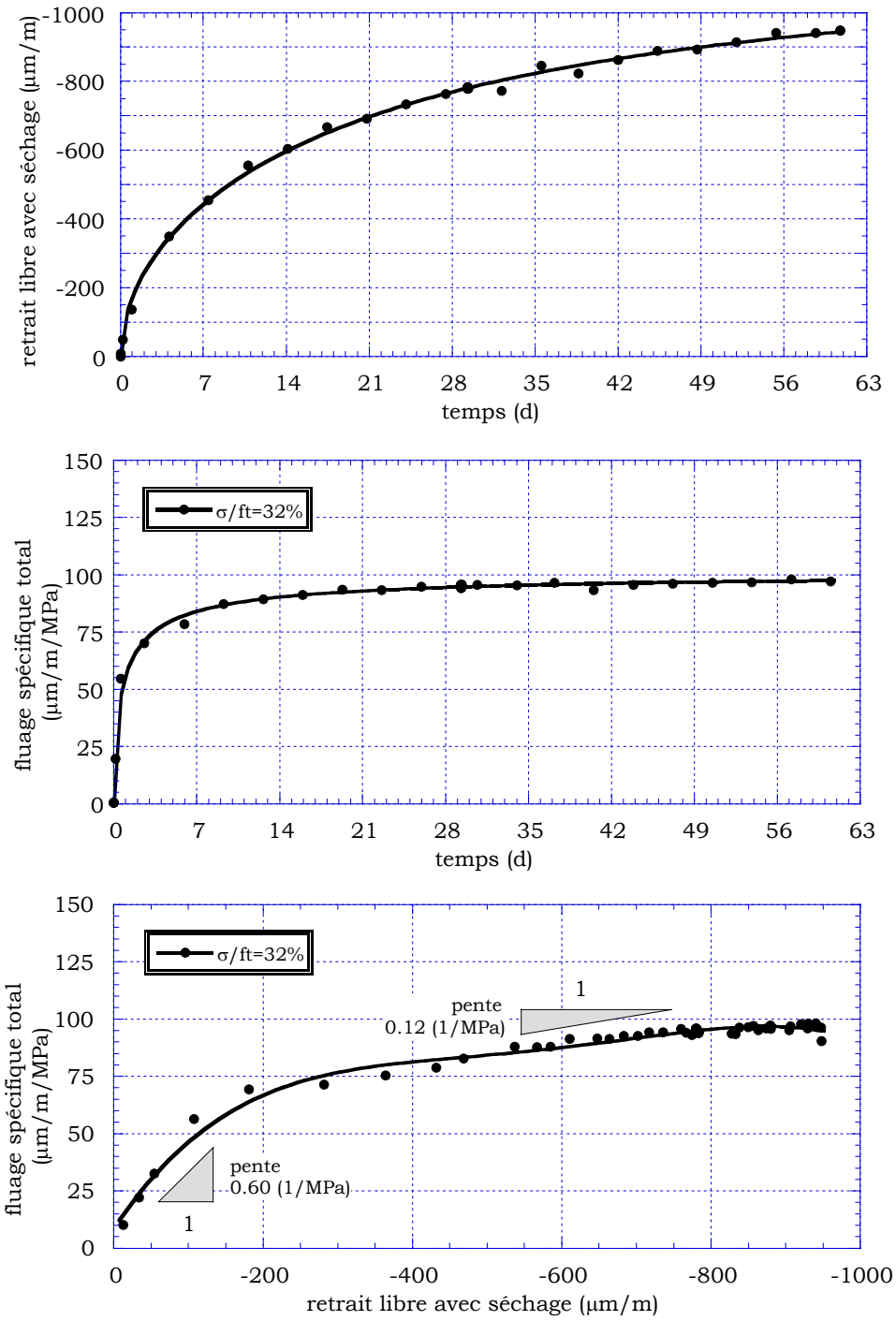


Figure 3 : Bilan des déformations de retrait libre et de fluage spécifique du Mortier Ordinaire en conditions d'échange hydrique (H.R.=50%, T=23°C)

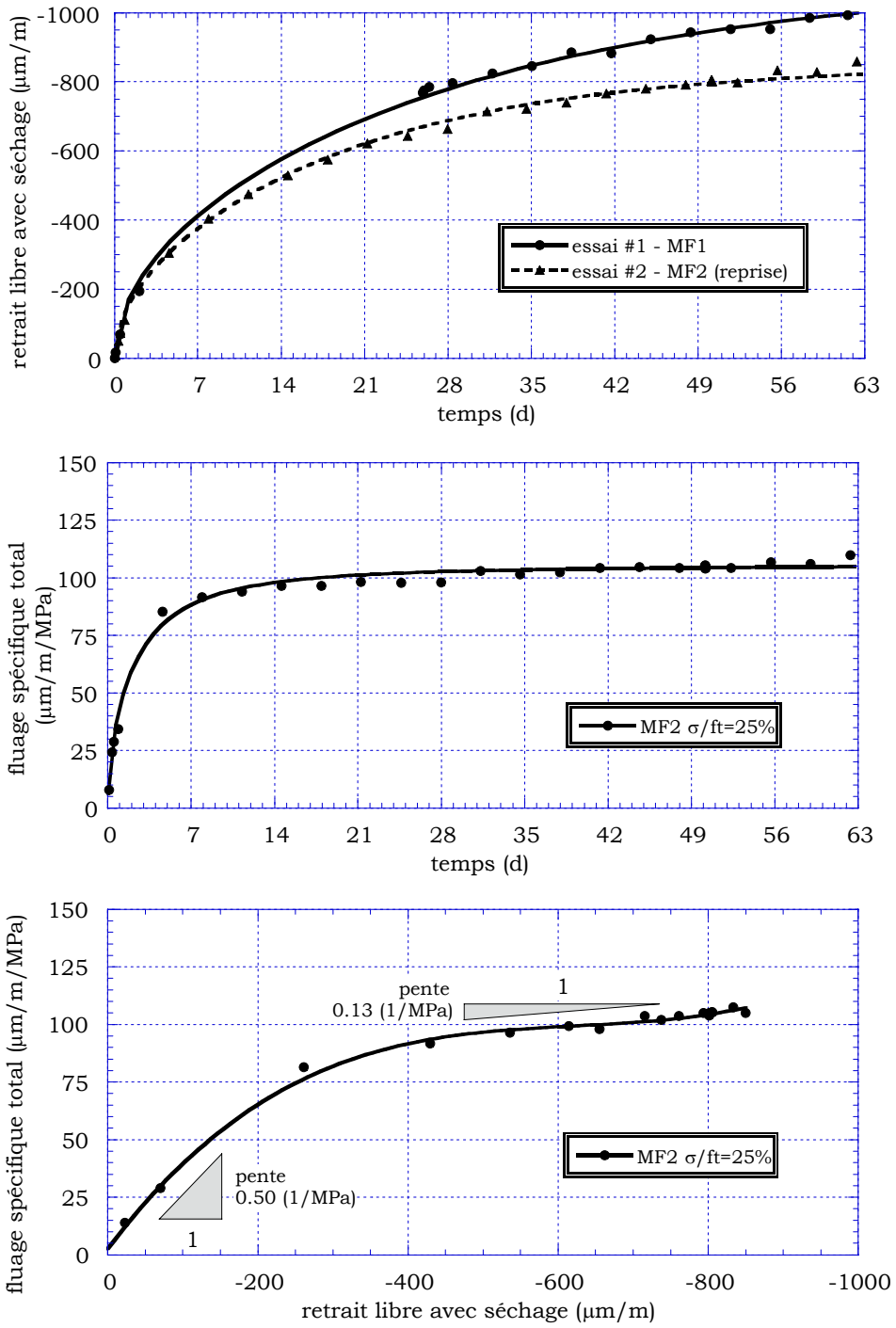


Figure 3 : Bilan des déformations de retrait libre et de fluage spécifique du Mortier Fibré en conditions d'échange hydrique (H.R.=50%, T=23°C)

ANNEXE 2 : RELEVÉS DE TEMPÉRATURE ET D'HUMIDITÉ SUR LE SITE D'EXPOSITION DES RÉPARATIONS

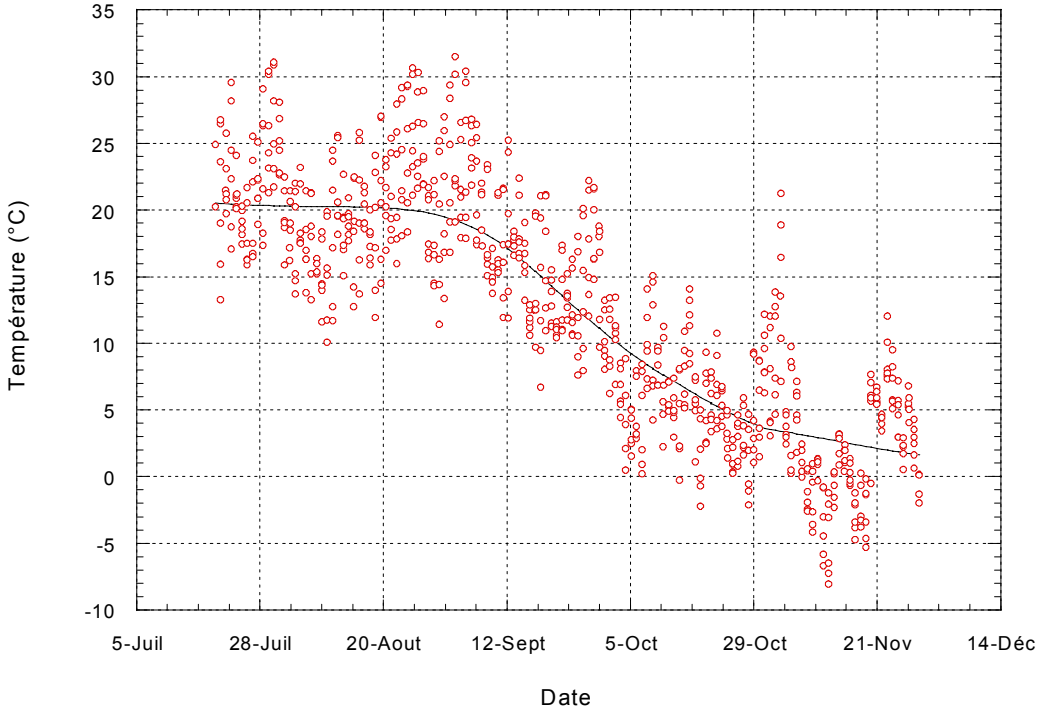


Figure 1:Températures enregistrées sur le site d'entreposage des réparations au cours de l'été 1999 et de l'automne 1999

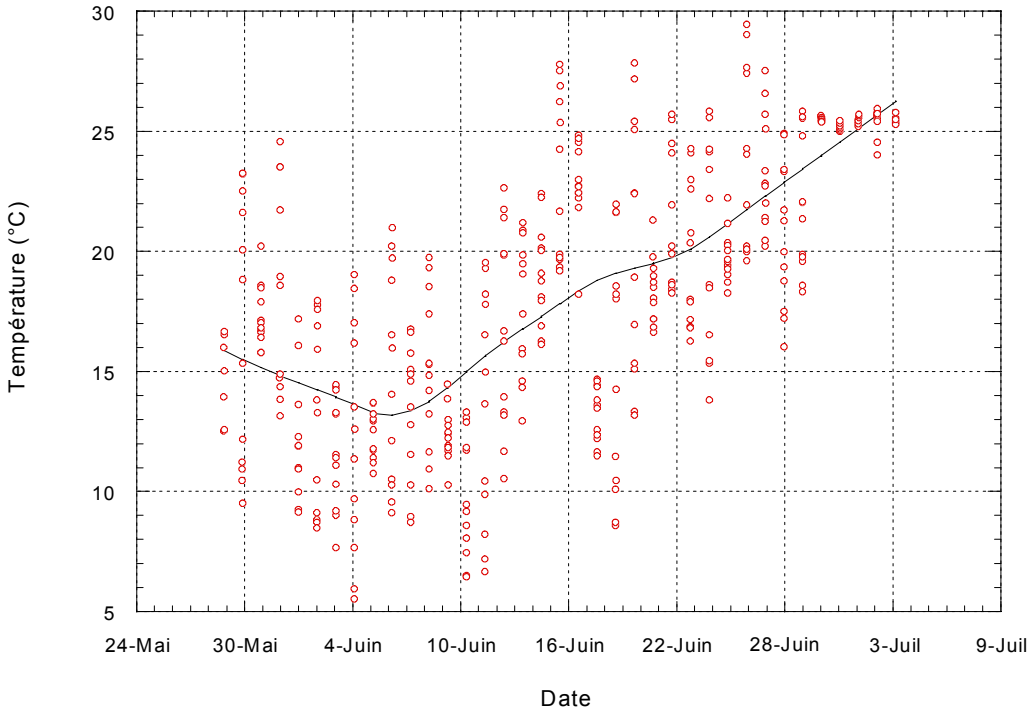


Figure 2:Températures enregistrées sur le site d'entreposage des réparations au cours de l'été 2000

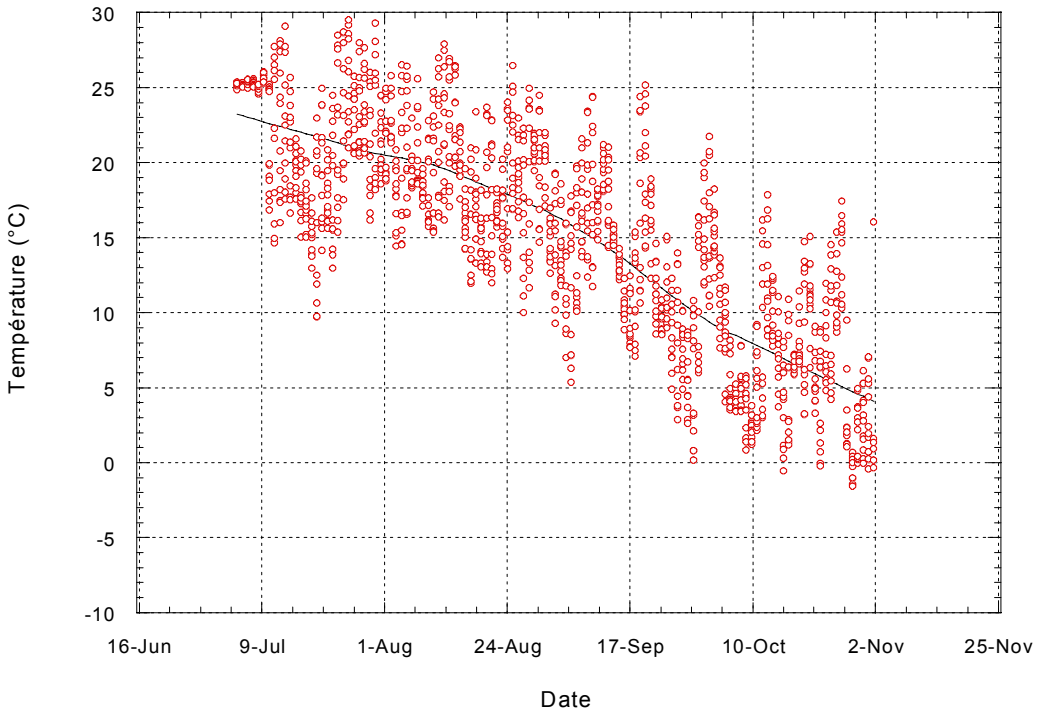


Figure 3:Températures enregistrées sur le site d'entreposage des réparations au cours de l'été 2000 et de l'automne 2000

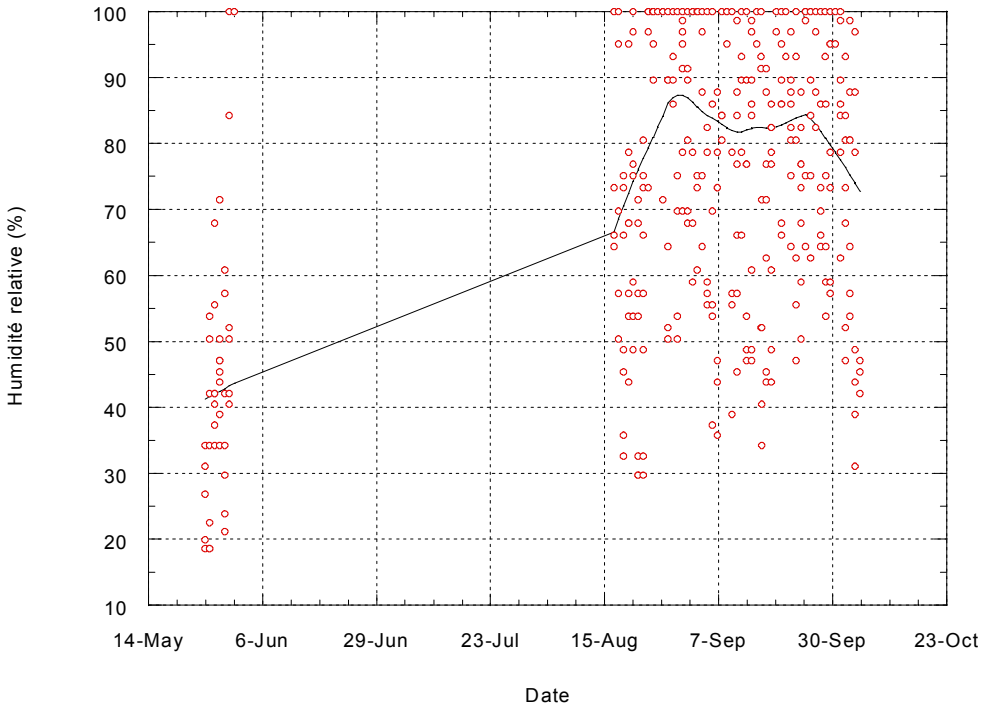


Figure 4: Humidité relative enregistrée sur le site d'entreposage des réparations au cours de l'été 1998

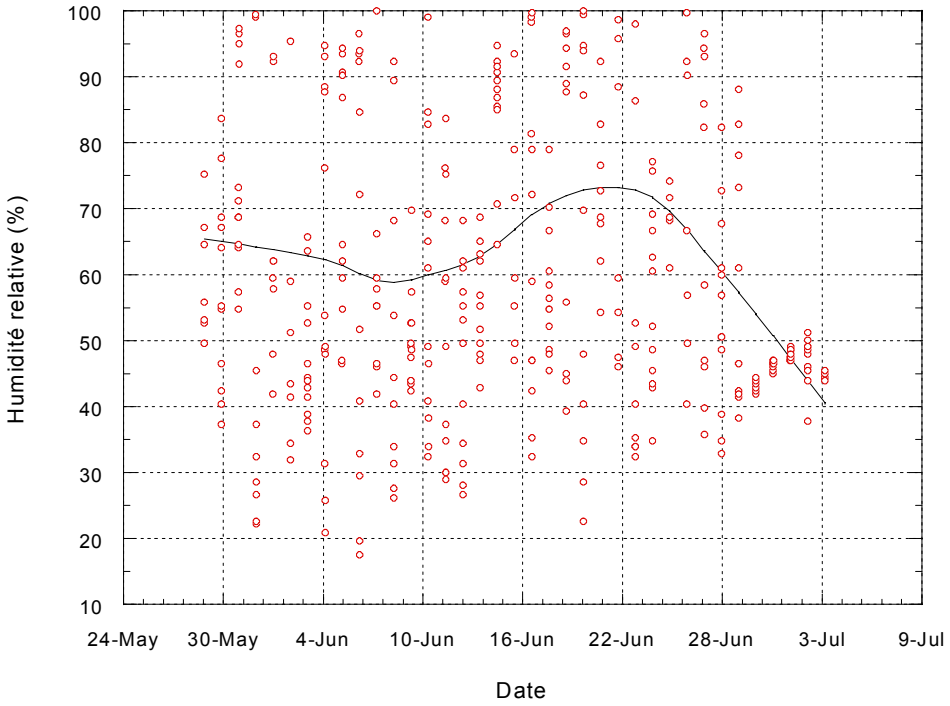


Figure 5:Humidité relative enregistrée sur le site d'entreposage des réparations au cours de l'été 2000

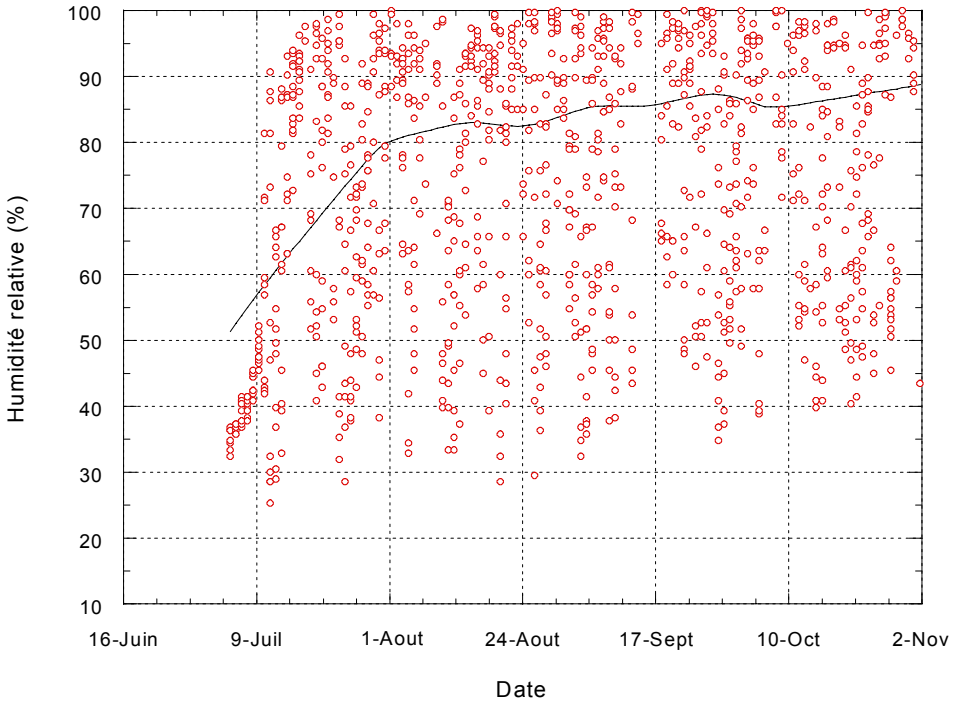


Figure 6:Humidité relative enregistrée sur le site d'entreposage des réparations au cours de l'été 2000 et de l'automne 2000

ANNEXE 3 : DÉFORMATIONS HYGROMÉTRIQUES DES PLAQUES D'ÉPAISSEUR 50 mm POUR LES 4 MATÉRIAUX

Chaque figure présente les déformations mesurées pour les trois paires de jauges placées à différentes profondeur (haut, milieu, bas)

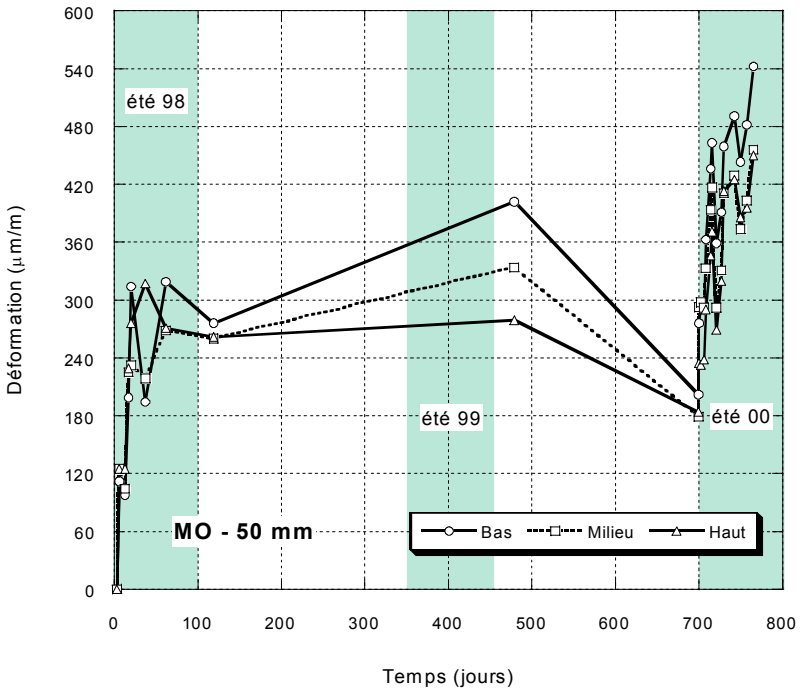


Figure 1 : Déformation totale de la plaque en mortier ordinaire de 50 mm

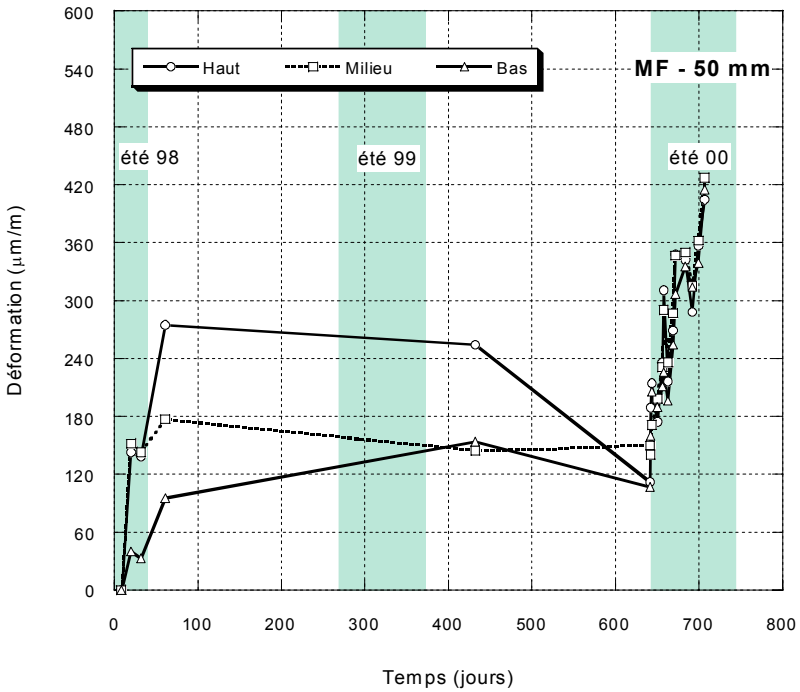


Figure 2 : Déformation totale de la plaque en mortier fibré de 50 mm

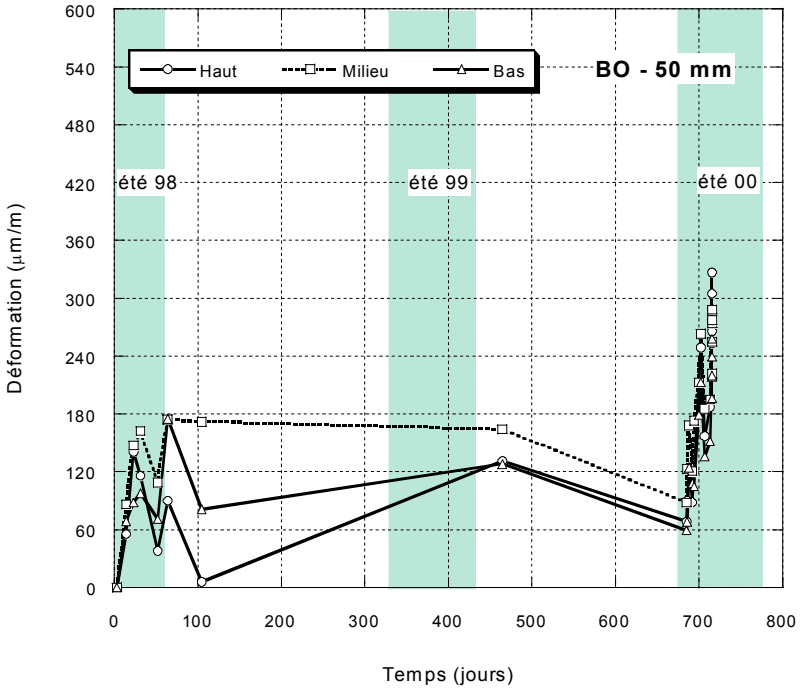


Figure 3 : Déformation totale de la plaque béton ordinaire de 50 mm

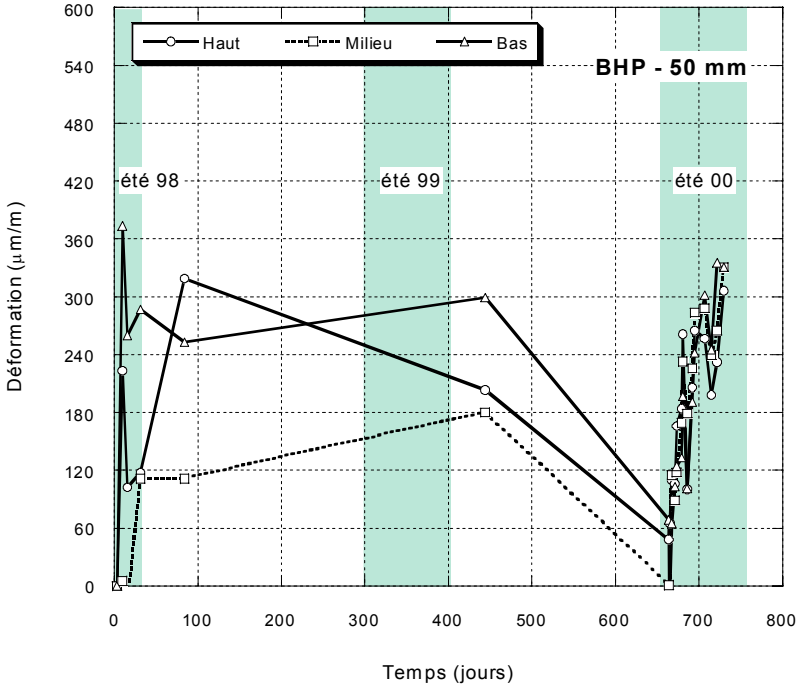


Figure 4 : Déformation totale de la plaque en béton hautes performances de 50 mm

ANNEXE 4: PARAMÈTRES DE FISSURATION DE SURFACE DES RÉPARATIONS

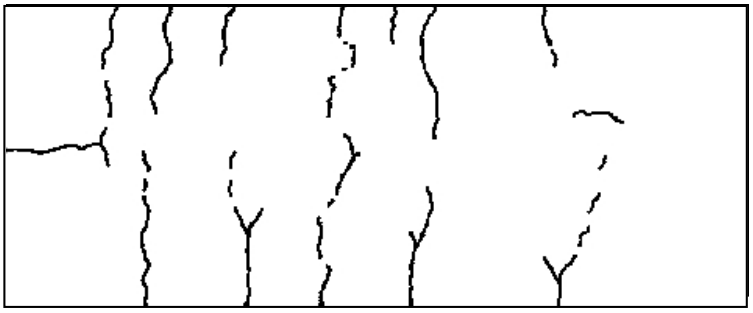
			Ouverture (µm)		Espacement	Indice de		
		échéance	maximum	moyenne	moyen (cm)	fissuration (µm/m)	Date	temps jours)
MO	**25 mm**	14 jours	15	10	18	50	13-07-98	13
30-06-98		3 mois	50	30	13	193	22-10-98	114
		1 an	60	34	12	248	22-09-99	449
		2 ans	60	39	12	479	17-08-00	779
	50 mm	14 jours	40	19	28	83	13-07-98	13
		3 mois	55	34	22	308	22-10-98	114
		1 an	80	38	14	395	13-09-99	440
		2 ans	100	56	15	647	17-08-00	779
	75 mm	14 jours	50	24	41	51	13-07-98	13
		3 mois	100	66	32	345	22-10-98	114
		1 an	100	56	19	480	13-09-99	440
		2 ans	100	66	19	602	17-08-00	779
MF	**25 mm**	14 jours	n.v.	n.v.	n.v.	nv	nv	nv
27-08-98		3 mois	n.v.	n.v.	n.v.	nv	nv	nv
		1 an	25	18	10	219	07-10-99	406
		2 ans	50	31	10	432	21-08-00	725
	50 mm	14 jours	n.v.	n.v.	n.v.	nv	nv	nv
		3 mois	n.v.	n.v.	n.v.	nv	nv	nv
		1 an	25	18	8	134	07-10-99	406
		2 ans	40	27	11	280	21-08-00	725
	75 mm	14 jours	n.v.	n.v.	n.v.	nv	nv	nv
		3 mois	n.v.	n.v.	n.v.	nv	nv	nv
		1 an	40	25	10	229	07-10-99	406
		2 ans	60	34	11	388	21-08-00	725
BO	**25 mm**	14 jours	n.m.	n.m.	n.m.	nm	nm	nm
14-07-98		3 mois	45	26	23	67	13-10-98	91
		1 an	60	35	24	191	05-10-99	448
		2 ans	70	43	19	236	21-08-00	769
	50 mm	14 jours	n.m.	n.m.	n.m.	nm	nm	nm
		3 mois	50	31	34	36	13-10-98	91
		1 an	80	46	22	248	26-09-99	439
		2 ans	80	44	26	290	21-08-00	769
	75 mm	14 jours	n.m.	n.m.	n.m.	nm	nm	nm
		3 mois	50	32	53	53	13-10-98	91
		1 an	100	52	23	223	26-09-99	439
		2 ans	100	57	23	258	21-08-00	769
BHP	**25 mm**	14 jours	n.m.	n.m.	n.m.	nm	nm	nm
04-08-98		3 mois	40	15	32	37	16-10-98	73
		1 an	40	38	24	120	05-10-99	427
		2 ans	80	42	20	198	15-08-00	742
	50 mm	14 jours	n.m.	n.m.	n.m.	nm	nm	nm
		3 mois	50	36	46	48	16-10-98	73
		1 an	70	44	34	157	07-10-99	429
		2 ans	100	51	27	274	15-08-00	742
	75 mm	14 jours	n.m.	n.m.	n.m.	nm	nm	nm
		3 mois	60	41	40	60	16-10-98	73
		1 an	80	59	40	226	07-10-99	429
		2 ans	110	55	38	250	15-08-00	742

n.v.: non visible

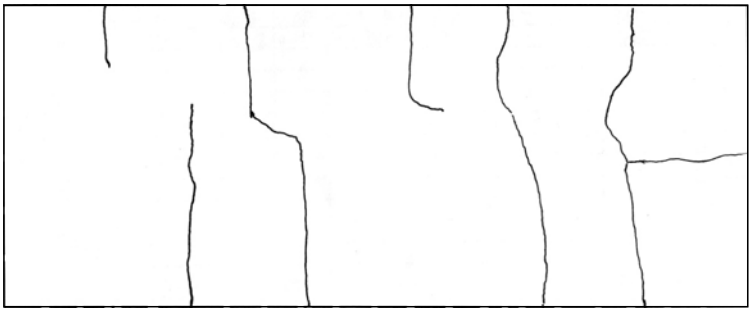
n.m.: non mesurable

ANNEXE 5 : RELEVÉS DE FISSURATION DE SURFACE DES RÉPARATIONS

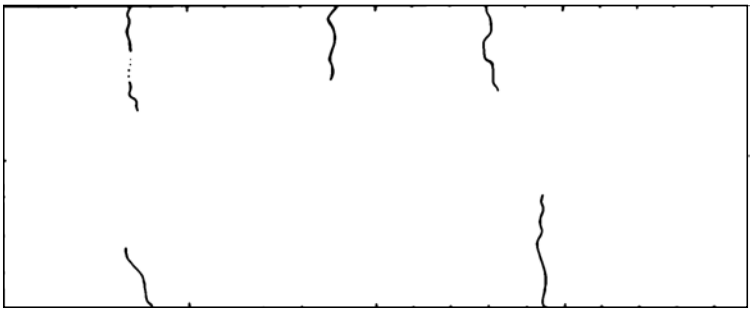
- Relevés de fissuration à l'échéance de 3 mois sur la surface totale de la poutre



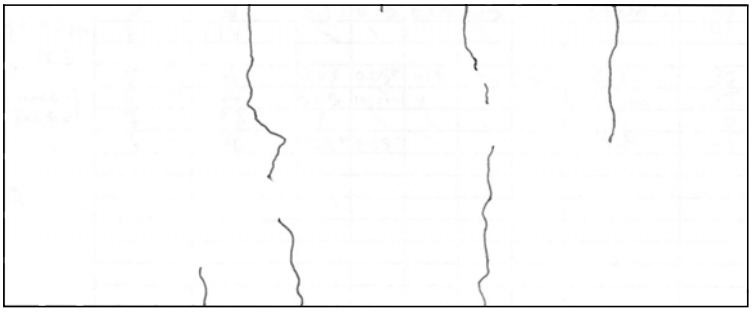
(a) : MO50



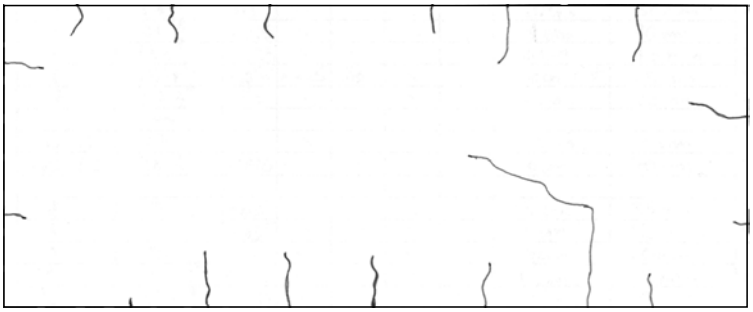
(b) : MO75



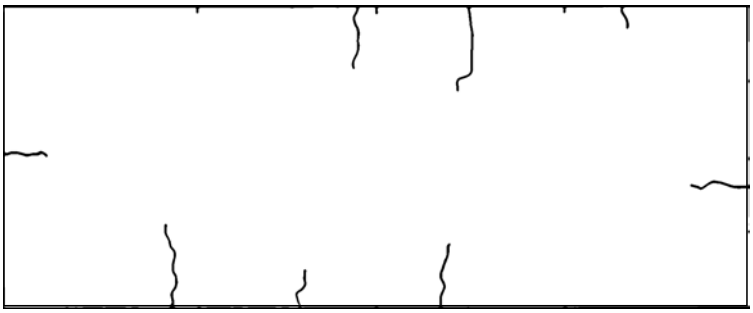
(c) : BHP50



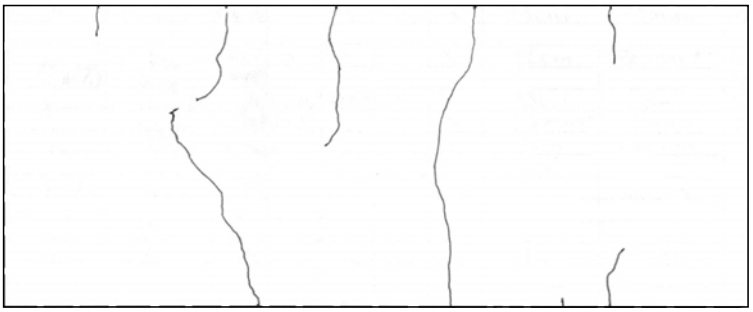
(d) : BHP75



(e) : BO25

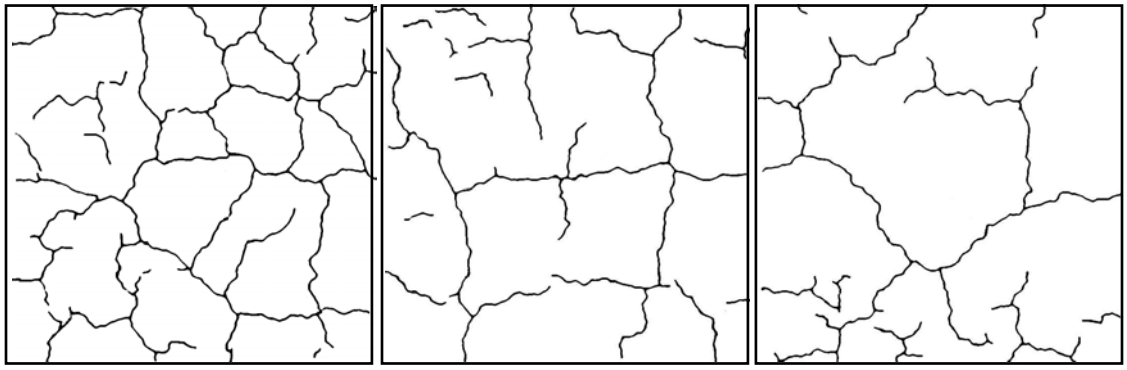


(f) : BO50

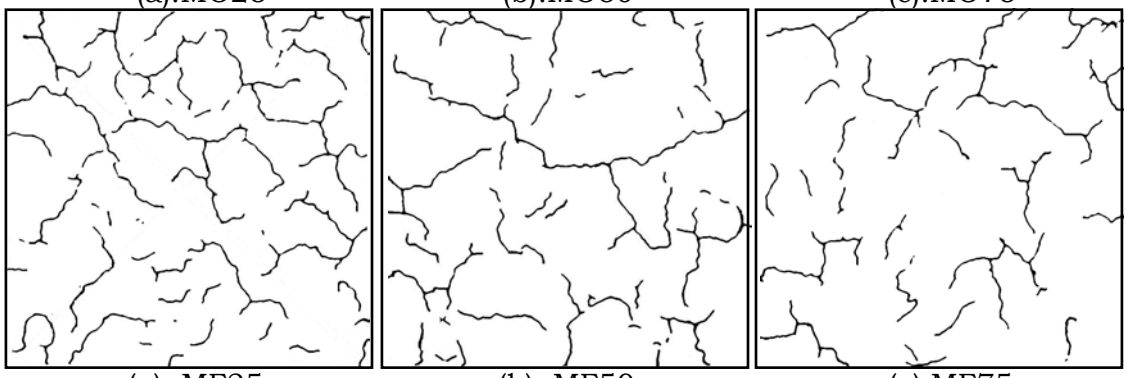


(g) : BO75

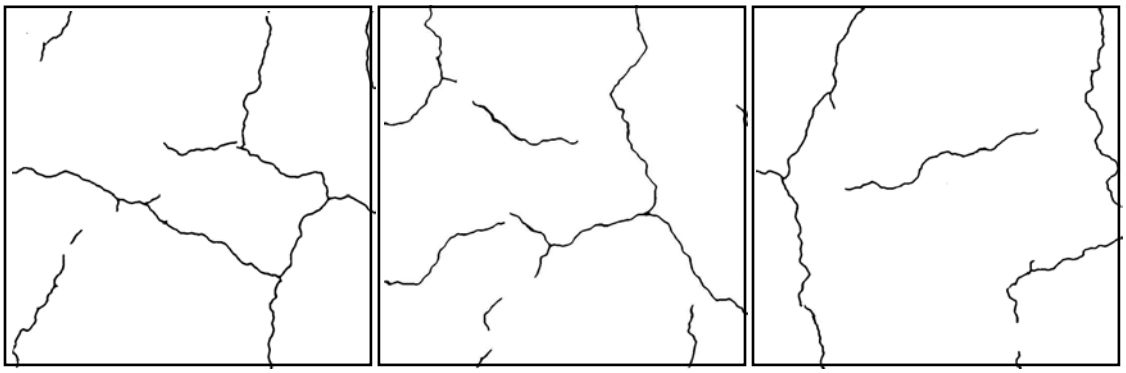
Relevés de fissuration de surface à 1 an sur les réparations



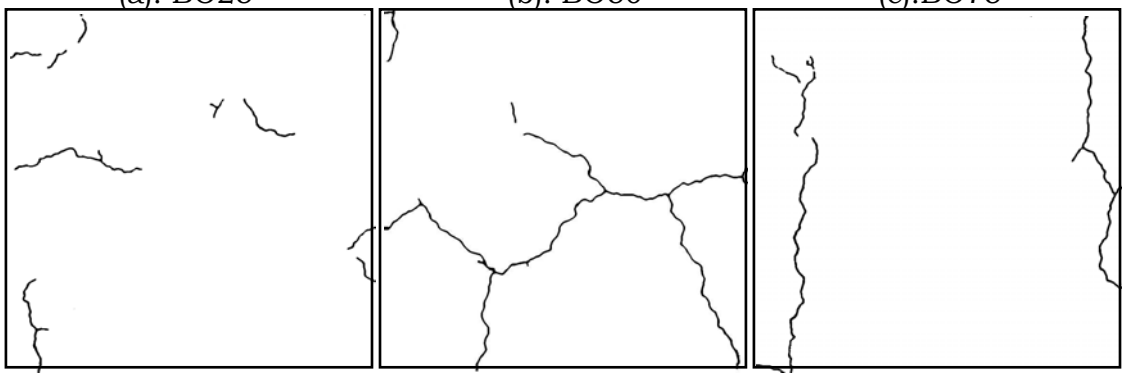
(a):MO25 (b):MO50 (c):MO75



(a): MF25 (b): MF50 (c):MF75



(a): BO25 (b): BO50 (c):BO75



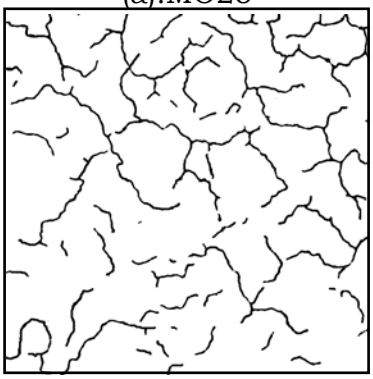
(a):BHP25 (b):BHP50 (c): BHP75

- Relevés de fissuration de surface à 2 ans sur les réparations

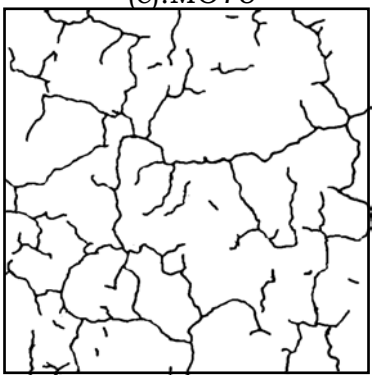
(a):MO25

(b):MO50

(c):MO75


(a):MF25

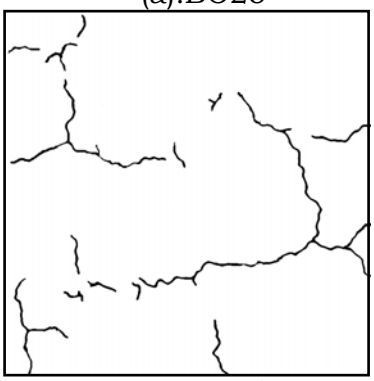
(b):MF50


(c):MF75

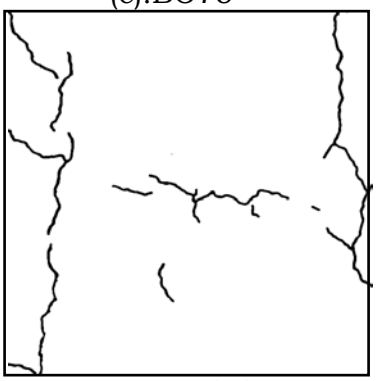
(a):BO25

(b):BO50

(c):BO75


(a):BHP25

(b):BHP50


(c):BHP75