

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Faculté de génie

Département de génie civil

**CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DES RÉSINES POLYURÉTHANNES D'INJECTION
UTILISÉES POUR LE TRAITEMENT DES INFILTRATIONS D'EAU
DANS LES TUNNELS EN SERVICE**

Mémoire de maîtrise ès sciences appliquées

Spécialité : génie civil

Jean-Philippe VRIGNAUD

Sherbrooke (Québec), Canada

Mars 2000



**National Library
of Canada**

**Acquisitions and
Bibliographic Services**

**385 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada**

**Bibliothèque nationale
du Canada**

**Acquisitions et
services bibliographiques**

**385, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada**

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

The author retains ownership of the copyright in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-67339-1

Canada

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à exprimer ma reconnaissance envers le Professeur Gérard Ballivy, mon directeur de recherche au Département de génie civil de l'Université de Sherbrooke, pour l'appui et la confiance qu'il m'a accordés pour mener à bien ce travail. Je le remercie aussi tout particulièrement de m'avoir permis de suivre des travaux en collaboration avec le ministère des Transports du Québec, expérience très enrichissante du point de vue professionnel et personnel.

Je voudrais remercier aussi Monsieur Christian Choquet du CETU (Centre d'Étude des Tunnels, France), qui m'a conseillé avant de venir effectuer mon stage de fin d'études et encourager à poursuivre en Maîtrise sur ce sujet.

Je voudrais également remercier Danielle Falardy et Stéphanie Perret, étudiantes au Doctorat au Département de génie civil qui m'ont encadré dès mon arrivée dans le groupe du Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée. Je les remercie tout particulièrement pour leur sympathie, leur amitié et pour tous les précieux conseils qu'elles m'ont donnés pour effectuer ce travail.

Merci également à Nicole, Georges, Danick et Martin, personnel au Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, pour leur disponibilité et leur aide.

Aussi, je remercie le ministère des Transports du Québec pour le soutien financier de ce projet de recherche et tout le personnel du MTQ de la Direction de l'Île de Montréal, avec qui j'ai eu l'occasion de travailler, au tunnel Ville-Marie et au pont-tunnel Louis-Hippolyte Lafontaine, et tout spécialement M. Réal Boisvert pour ses conseils et la confiance qu'il m'a accordé.

En terminant, j'adresse un grand merci à tous mes collègues et amis qui m'ont accompagné tout au long de mon séjour au Québec.

RÉSUMÉ

Les résines polyuréthannes sont utilisées depuis longtemps avec succès pour le traitement des venues d'eau dans les tunnels en service. Une fois injectée dans les fissures d'une structure en béton, la mousse polyuréthane forme une barrière imperméable capable de reprendre la pression de l'eau. Seulement, le comportement à long terme de ces matériaux est encore mal connu à l'heure actuelle et on ne sait pas si une telle réparation peut être durable. Au Québec, particulièrement, l'influence de la température sur le mouvement des structures en béton est très importante.

Le sujet de ce mémoire porte sur l'étude du comportement de plusieurs type de résines polyuréthannes utilisées dans l'étanchéité des ouvrages souterrains. Dans le but de connaître la durabilité d'une telle réparation, une étude a été réalisée au laboratoire. Celle-ci comprenait la rupture en traction d'éprouvettes de béton fracturées artificiellement et injectées avec différents types de résines polyuréthannes aquaréactives, hydrophobes flexibles et semi-rigides. Les essais réalisés étaient des essais de traction directe et des essais en déplacement cyclique. Les résultats de ces essais ont montré une différence importante de comportement de ces matériaux selon le type de résine et suivant les conditions d'humidité du béton (saturé ou sec) rencontrées au moment de l'injection.

Les produits les plus performants ont alors été sélectionnés en vue d'une application sur plusieurs chantiers d'injection, en particulier dans le cadre de la réfection des tunnels autoroutier Ville Marie, et Louis-Hippolyte-Lafontaine, à Montréal (Québec, Canada). L'étanchéité a pu ainsi être réalisée par injection de résines polyuréthannes de type hydrophobe et semi-rigide. Ces travaux de recherche ont également montré que chaque projet est bien spécifique et que, si la sélection des produits d'injection compte beaucoup pour la réussite du traitement, le choix de la méthode doit également être correctement choisie et adaptée à chaque site étudié.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
CHAPITRE 1 : INTRODUCTION	1
1.1 Problématique	1
1.2 Objectifs du projet	2
1.3 Déroulement du projet	3
CHAPITRE 2 : ÉTAT DES CONNAISSANCES	5
2.1 Traitements des infiltrations dans les tunnels	5
2.1.1 Choix du traitement	5
2.1.2 Principaux types de traitement	6
2.1.3 Avantages et inconvénients liés à chacune des méthodes.....	8
2.2 Effets des variations de températures sur une structure souterraine au Québec.....	9
2.2.1 Variations volumétriques du béton	9
2.2.2 Données climatiques de l’Ile de Montréal	10
2.2.3 Application aux mouvements des joints d’expansion et des fissures pour le cas d’un tunnel revêtu	13
2.3 Les résines polyuréthannes utilisées pour l’injection d’étanchéité.....	14
2.3.1 Définitions	14
2.3.2 Historique	16
2.3.3 Réactions chimiques	17
2.3.4 Propriétés	20
2.3.5 Critères de sélection des résines polyuréthannes	29
2.4 Facteurs influençant le comportement de la résine avant et après gélification	30
2.5 Technique d’injection	32
2.5.1 Introduction	32
2.5.2 Préparation des forages d’injection	32
2.5.3 Nettoyage des fissures et essai d’eau	34
2.5.4 Colmatage	35
2.5.5 Injection du coulis	35
2.5.6 Résultat final des travaux d’injection	39
2.6 Synthèse	40

CHAPITRE 3 : PROGRAMME EXPÉRIMENTAL	41
3.1 Approche expérimentale	41
3.2 Sélection des produits utilisés	43
3.3 Essai de compatibilité de la résine avec l'eau et l'accélérateur	45
3.3.1 Méthodologie	45
3.3.2 Choix des paramètres	46
3.3.3 Procédure de l'essai	48
3.4. Essai de traction et essai cyclique sur fissure injectée	50
3.4.1 Méthodologie	50
3.4.2 Choix des paramètres d'essai	51
3.4.3 Présentation du montage expérimental	53
3.4.4 Caractéristiques de la presse et des instruments de lecture	59
3.4.5 Présentation des résultats de l'essai	60
CHAPITRE 4 : ANALYSE DES ESSAIS DE LABORATOIRE	61
4.1 Essais de compatibilité	61
4.1.1 Influence de la quantité d'accélérateur	61
4.1.2 Influence de la quantité d'eau	64
4.1.3 Retrait au séchage	67
4.1.4 Synthèse des essais de compatibilité	69
4.2 Injection des échantillons de béton fracturés	70
4.2.1 Introduction	70
4.2.2 Ajustement de la procédure	70
4.2.3 Évolution de la pression d'injection	72
4.2.4 Synthèse des résultats de l'injection	79
4.3 Essais de traction	81
4.3.1 Essais sur échantillons secs	81
4.3.2 Essais sur échantillons humides	82
4.3.3 Synthèse des essais de traction	89
4.4 Essais cycliques de compression-décompression	91
4.4.1 Essais sur résines hydrophobes semi-rigides	91
4.4.2 Essais sur une résine flexible	97

4.4.3 Essais sur une résine hydrophile	97
4.4.4 Synthèse des essais cycliques	100
4.5. Synthèse des essais de laboratoire	100
CHAPITRE 5 : PRÉSENTATION DE DEUX CAS D'APPLICATION	102
5.1 Pont-tunnel Louis-H.-Lafontaine	102
5.1.1 Présentation de l'ouvrage	102
5.1.2 Problématique et objectifs des travaux d'injection	103
5.1.3 Présentation des travaux d'injection.....	105
5.1.4 Cas de l'injection d'un joint de la tour de ventilation nord	105
5.1.5 Discussion sur le résultat des travaux d'injection	110
5.2 Tunnel Ville-Marie	111
5.2.1 Présentation de l'ouvrage	111
5.2.2 Problématique	112
5.2.3 Présentation des travaux d'injection	116
5.2.4 Résultat des travaux d'injection	117
5.3. Synthèse des travaux d'injection en chantier	118
CHAPITRE 6 :CONCLUSION	119
6.1 Partie expérimentale au laboratoire	119
6.2 Application en chantier	121
6.3 Recommandations	122
BIBLIOGRAPHIE	123
ANNEXES	127
Annexe A : Fiches techniques des principaux produits.....	128
Annexe B : Résultats des essais de compatibilité.....	136
Annexe C : Résultats des essais de traction et des essais cycliques	147
Annexe D : Plans des tunnels Louis-H.-Lafontaine et Ville-Marie.....	172
Annexe E : Références des rapports du laboratoire sur les problèmes d'infiltration et les méthodes de traitement par injection	175

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Trois principaux types de traitements contre les infiltrations d'eau dans un tunnel en service	7
Tableau 2.2	Moyennes des températures mensuelles (°C) sur l'Ile de Montréal	11
Tableau 2.3	Les différentes familles de produits d'injection	14
Tableau 2.4	Comparaison des propriétés des résines hydrophobes et hydrophiles	21
Tableau 2.5	Facteurs influençant la rigidité de la mousse	23
Tableau 2.6	Comparaison de la viscosité de quelques produits courants et des coulis d'injection	26
Tableau 2.7	Comparaison des propriétés des résines polyuréthannes et des coulis de ciment.....	28
Tableau 2.8	Caractéristiques d'un polyuréthane « idéal »	29
Tableau 2.9	Facteurs influençant l'injection de la résine et le comportement de la mousse	31
Tableau 3.1	Résines testées au cours de ce projet.....	44
Tableau 3.2	Composition du béton utilisé pour les échantillons	54
Tableau 4.1	Composition (eau et accélérateur) et caractéristiques des résines utilisées pour le montage expérimental.....	69
Tableau 4.2	Résultats des deux essais de traction sur la résine PF 930 – échantillons secs..	81
Tableau 4.3	Résultats des essais de traction sur les résines semi-rigides PF 930 et H 100 (échantillons humides)	83
Tableau 4.4	Résultats des 2 essais de traction sur la résine F 1000	84
Tableau 4.5	Résultats des 6 essais de traction sur la résine 900 LVSF.....	88
Tableau 4.6	Résultats des essais cycliques sur les résines H 100 et PF 930	92
Tableau 4.7	Résultats des 7 essais de traction après 30 cycles – 900 LVSF	98
Tableau 5.1	Campagnes d'injection réalisées au pont-tunnel L.-H.-Lafontaine	105
Tableau 5.2	Quantité de coulis utilisée pour l'injection de la tour de ventilation nord	109
Tableau 5.3	Exigences pour le produit d'injection spécifiées dans le devis	116
Tableau 5.4	Campagnes d'injection réalisées au tunnel Ville-Marie.....	117

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Organigramme du déroulement du projet	4
Figure 2.1	Cas d'une infiltration d'eau portant atteinte à la sécurité routière	6
Figure 2.2	Évolution de la température moyenne mensuelle pendant une année sur l'Île de Montréal	11
Figure 2.3	Variations de température et mouvements de fissures observés pendant une année au pont-tunnel Louis-H.-Lafontaine	12
Figure 2.4	Ouverture d'un joint d'expansion lors d'un abaissement de température.....	13
Figure 2.5	Classification des coulis chimiques.....	15
Figure 2.6	Courbe type d'expansion d'une mousse polyuréthane.....	19
Figure 2.7	Comparaison de la rhéologie des fluides Binghamien et Newtonien.....	26
Figure 2.8	Comparaison de l'injectabilité dans les sols des résines et des autres coulis d'injection.....	27
Figure 2.9	Technique d'injection utilisée pour colmater une fissure ou un joint au mur et au plafond d'un tunnel avec de la résine polyuréthane.....	32
Figure 2.10	Patron d'injection généralement utilisé pour l'injection au polyuréthane.....	33
Figure 3.1	Exemple de fiche technique du produit Prime-Flex 930, de Ambex	42
Figure 3.2	Essai de compatibilité.....	49
Figure 3.3	Dimension de l'échantillon de béton	53
Figure 3.4	Forage du trou d'injection et répartition de la résine au cours de l'injection.....	56
Figure 3.5	Montage expérimental	57
Figure 4.1	Temps de réaction de la résine F 1000 vs % Acc.	62
Figure 4.2	Temps de réaction de la résine PF 930 vs % Acc.	62
Figure 4.3	Expansion des résines F 1000 et PF 930 vs %	62
Figure 4.4	Temps de réaction de la résine F 1000 vs % eau	65
Figure 4.5	Temps de réaction de la résine PF 930 vs % eau	65
Figure 4.6	Temps de réaction des résines H 100 vs % eau	65
Figure 4.7	Expansion des résines H 100, F 1000 et PF 930 vs % eau	65
Figure 4.8	Expansion de la résine 900 LVSF vs % eau	66
Figure 4.9	Temps de réaction final de la résine 900 LVSF vs % eau	66
Figure 4.10	Perte d'eau au séchage - PF 930	68
Figure 4.11	Perte d'eau au séchage - F 1000	68

Figure 4.12	Perte d'eau au séchage – 900 LVSF	68
Figure 4.13	Pression maximale générée lors de l'injection du PF 930 en fonction de la quantité de mousse effectivement injectée	73
Figure 4.14	Calcul du volume final occupé par la mousse	73
Figure 4.15	Évolution de la pression pendant l'injection - échantillon SRA18	75
Figure 4.16	Évolution de la pression pendant l'injection de l'échantillon SRB15	76
Figure 4.17	Évolution de la pression pendant l'injection de l'échantillon F3.....	77
Figure 4.18	Pression maximal générée lors de l'injection du PR 900 LVSF en fonction de la quantité de mousse effectivement injectée.....	78
Figure 4.19	Évolution de la pression pendant l'injection de l'échantillon Hi17.....	79
Figure 4.20	Comparaison de l'évolution de la pression pendant l'injection de trois résines hydrophobe semi-rigide, hydrophobe flexible et hydrophile.....	80
Figure 4.21	Essai de traction sur l'échantillon SRA1 (échantillon sec)	82
Figure 4.22	Essai de traction sur l'échantillon SRB4 (échantillon humide).....	84
Figure 4.23	Évolution de la pression pendant l'injection (Échantillon Hi2).....	85
Figure 4.24	Changement de signe de la pression enregistrée ente la réaction de la résine et on retrait (Échantillon Hi2).....	86
Figure 4.25	Évolution de la pression pendant le retrait de la mousse (Échantillon Hi2).....	86
Figure 4.26	Essai de traction sur l'échantillon Hi2	87
Figure 4.27	Essai de traction sur l'échantillon Hi4	89
Figure 4.28	Comparaison de trois courbes de traction pour trois résines hydrophobes semi-rigide, hydrophobe flexible et hydrophile	90
Figure 4.29	Deux premiers cycles de déplacement d'amplitude 1 mm (Échantillon SRA14)	93
Figure 4.30	Essai cyclique (30 cycles de 1 mm) sur l'échantillon SRA14	93
Figure 4.31	Premier cycle réalisé sur l'échantillon SRA14.....	94
Figure 4.32	Essai cyclique SRA14 – zone de traction de la mousse	95
Figure 4.33	Évolution de la contrainte de traction en fonction du temps (SRA14)	96
Figure 4.34	Essai de traction sur l'échantillon SRA14 après 30 cycles	96
Figure 4.35	Essai cyclique (30 cycles de 2 mm) sur l'échantillon F3	97
Figure 4.36	Essai cyclique sur l'échantillon Hi9	98
Figure 4.37	Essai de traction sur l'échantillon Hi9 après 30 cycles	99
Figure 4.38	Essai cyclique sur l'échantillon Hi17	99

Figure 5.1	Emplacement des joints 6/7 et 7/8 ainsi que de la tour de ventilation nord	103
Figure 5.2	Vue en coupe de la tour de ventilation nord (direction nord) et localisation de l'instrumentation	104
Figure 5.3	Localisation des forages d'injection au coulis chimique - PTLHL	107
Figure 5.4	Répartition du coulis chimique dans la tour de ventilation nord - PTLHL	110
Figure 5.5	Instrumentation posée au tunnel Ville-Marie et pressions d'eau mesurées au 18-12 1998, juste après la pose des piézomètres	113

LISTE DES PHOTOS

Photo 2.1	Fissuration et venue d'eau diffuses au niveau de la voûte d'un tunnel	8
Photo 2.2	Manchons de différents diamètres utilisés pour l'injection à la résine	34
Photo 2.3	Pompe utilisée pour l'injection de la résine	36
Photo 2.4	Injection d'un joint d'expansion au mur, avec venue d'eau	37
Photo 3.1	Exemple d'essai de compatibilité sur la résine PF 930	49
Photo 3.2	Échantillon de béton	53
Photo 3.3	Fracturation d'un échantillon par fendage	55
Photo 3.4	Échantillon de béton fracturé	55
Photo 3.5	Injection d'un échantillon sur la presse	58
Photo 3.6	Échantillon injecté, prêt pour l'essai de traction (avec les 2 extensomètres)	59
Photo 4.1	Influence de la quantité d'accélérateur sur l'expansion de la résine hydrophobe semi-rigide PF 930	62
Photo 4.2	Expansion (EXP=6) de la mousse 900 LVSF (20% d'eau).....	66
Photo 4.3	Échantillon 900 LVSF à 5, 10, 15, 20, 30 % d'eau.....	66
Photo 4.4	Retrait au séchage (28 j) de la mousse hydrophile 900 LVSF	68
Photo 4.5	Injection d'un échantillon avec la résine PF 930	74
Photo 4.6	Échantillon Hi2 après la rupture.....	87
Photo 5.1	Vue du joint sud du VE 153 juste après l'injection à partir du coin SE.....	109
Photo 5.2	Venue d'eau lors du forage dans le radier de la voie B	113
Photo 5.3	Vue du tunnel lors de la construction	114

SYMBOLES, UNITÉS ET CONVENTIONS DE SIGNES

Symboles :

e : ouverture de la fissure

e_i : ouverture initiale de la fissure

Δl = déplacement

ΔT = variation de température

α = coefficient de dilatation thermique

η : viscosité plastique

τ : contrainte de cisaillement

τ_0 : seuil de cisaillement

$TI()$: temps de réaction initial

$TF()$: temps de réaction final

V_f = volume final de mousse (résine après gélification)

V_i = volume initial de résine (avant gélification)

EXP : facteur d'expansion ou Expansion (libre ou confinée) $EXP = V_f/V_i$

P_{max} : pression maximale générée lors de l'expansion de la mousse

σ_r : contrainte de rupture en traction

ε_r : déformation à la rupture en traction

E/C : rapport eau/ciment

Unités :

cP : centipoise, unité de viscosité dynamique (1 Pa.s = 1000 cPs)

Conventions de signe :

Contrainte :

$\sigma > 0$ en traction

$\sigma < 0$ en compression

Déplacement :

$\Delta l > 0$ si la fissure s'ouvre ($e > e_i$)

$\Delta l < 0$ si la fissure se ferme ($e < e_i$)

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION

1.1 Problématique

L'âge des structures et les infiltrations d'eau souterraine sont les problèmes les plus sérieux qui affectent l'intégrité structurale des tunnels [RUSSELL et coll., 1993]. Ainsi, dans un tunnel routier en service qui présente d'importantes infiltrations d'eau, il est primordial d'exécuter des travaux destinés à restaurer l'étanchéité. Ceci permet non seulement d'assurer la sécurité des usagers et du personnel, mais également de prévenir le vieillissement accéléré de la structure.

Au Québec, la sévérité du climat, qui se traduit par les écarts de température importants suivant les saisons, entraîne plusieurs problèmes supplémentaires. D'une part, la dégradation du béton par les cycles gel-dégel, et par conséquent, les venues d'eau sont amplifiées. Il faut donc impérativement conserver des joints souples dans le revêtement. D'autre part, les conséquences sur la sécurité du trafic sont aggravées par la formation de glace dans la période hivernale.

Plusieurs types de traitements peuvent ainsi être utilisés pour bloquer ou contrôler les infiltrations d'eau dans un tunnel ou encore pour les réduire à un niveau acceptable : le drainage, l'imperméabilisation à l'aide d'une membrane ou bien l'injection. Parmi ces techniques, seule l'injection permet d'empêcher efficacement la dégradation du béton. Cependant, puisqu'il faut conserver des joints souples dans le revêtement, les coulis d'injection de ciment ou d'époxy rigides sont donc à proscrire et le choix du coulis doit s'orienter vers un matériau flexible, tel que les résines à base de polyuréthane. Ces résines organiques ont été développées à la fin des années 60 au Japon et étaient d'abord utilisées pour la consolidation de sols ou le blocage rapide des venues d'eau lors d'excavations souterraines. Aujourd'hui, la diversité des résines polyuréthanes d'injection permet de les utiliser dans plusieurs applications, dont la réfection de l'étanchéité de conduites ou de structures souterraines fissurées sujettes à des mouvements différentiels.

Cependant, si sa grande efficacité a été démontrée pour bloquer des venues d'eau à court terme, le comportement à long terme des polyuréthanes est encore très mal connu. Dans le cas

particulier de la réparation des tunnels en service, l'utilisation des résines polyuréthanes étant assez récente, il est difficile d'évaluer sur le terrain l'efficacité à long terme de ces produits. Bien souvent, le mauvais choix du coulis ou une mauvaise qualité de réalisation de l'injection conduit à l'échec de la réparation. De plus, les cas d'application des produits, les succès ou les échecs de travaux d'injection à la résine polyuréthane ainsi que les différentes méthodes développées jusqu'à maintenant sont très peu documentés. Il n'existe pas, dans ce domaine, de guides ou de normes décrivant les produits à utiliser, ni d'essai normalisé permettant de sélectionner les produits adéquats pour un projet de réparation.

Deux éléments principaux conditionneront la durabilité des mousses polyuréthanes injectées. Le premier est la conservation dans le temps des qualités spécifiques de la mousse. Or, la simulation du vieillissement en laboratoire de ces produits est très difficile à organiser, comme en témoigne le peu de publications sur ce sujet. Un deuxième facteur est la qualité de la réalisation de l'injection. En effet, cette technique nécessite la mise en œuvre de matériel et de matériaux assez inhabituels dans les entreprises de génie civil : le personnel doit être qualifié et expérimenté dans le domaine de l'injection des résines. Le choix de la résine la plus performante devra donc être fait principalement selon sa facilité de mise en œuvre sous des températures hivernales et sur la durabilité de la mousse injectée.

1.2 Objectifs du projet

Plusieurs types de résines polyuréthanes ont été développées par l'industrie dans des domaines très variés du génie civil, tels que la consolidation de sols, l'étanchéité ou la réparation de structures. Aujourd'hui, le maître d'ouvrage qui doit faire face à des problèmes d'infiltrations d'eau dans un tunnel doit faire un choix difficile entre de très nombreux produits. La présente étude a donc plusieurs objectifs :

- Analyser les méthodes et les critères de sélection utilisés actuellement dans l'injection des résines polyuréthanes ;
- Étudier le comportement à moyen et long terme de différents types de produits au laboratoire et discuter la durabilité du traitement ;

- **Établir une sélection des résines polyuréthannes les plus performantes dans l'optique de travaux d'injection, et étudier leur comportement sur chantier.**
- **Faire la synthèse des deux études réalisées à la fois au laboratoire et sur le chantier**

1.3 Déroulement du projet

Ce projet de recherche a été mené en collaboration avec le ministère des Transports du Québec (Direction de l'Île de Montréal) pour faire l'étude et le suivi de deux ouvrages situés à Montréal, soit le pont-tunnel Louis-Hippolyte-Lafontaine et le tunnel Ville-Marie. Le ministère a chargé le Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée de l'Université de Sherbrooke de valider la méthode et les produits d'injection utilisés pour le traitement des infiltrations d'eau dans ces ouvrages, ainsi que de suivre les travaux d'injection et la tenue de l'étanchéité après les travaux. A cause des échéanciers de ces travaux, il n'a pas été possible de compléter toute la phase expérimentale avant les travaux de chantier. Ces projets ont donc été conduits simultanément aux travaux de laboratoire. Le déroulement des travaux de recherche (Fig. 1.1) a comporté ainsi trois phases principales :

- 1. Une recherche bibliographique, permettant de connaître les produits et les méthodes utilisés actuellement. Cette recherche a ainsi orienté la phase expérimentale de ce projet vers l'étude des produits les mieux adaptés.**
- 2. La phase expérimentale : dans un premier temps, des essais de caractérisation ont permis d'étudier le comportement de la résine pendant l'injection et de choisir les coulis les plus performants pour les essais suivants ; dans un deuxième temps, la conception et la réalisation d'un montage expérimental a permis de simuler le comportement de la mousse injectée dans une fissure ou un joint.**
- 3. Les travaux de chantier : l'analyse des résultats en laboratoire a permis de choisir et de valider les résines polyuréthannes les plus performantes sur le chantier. Les résultats obtenus en chantier ont permis de comparer le comportement des résines en chantier et au laboratoire.**

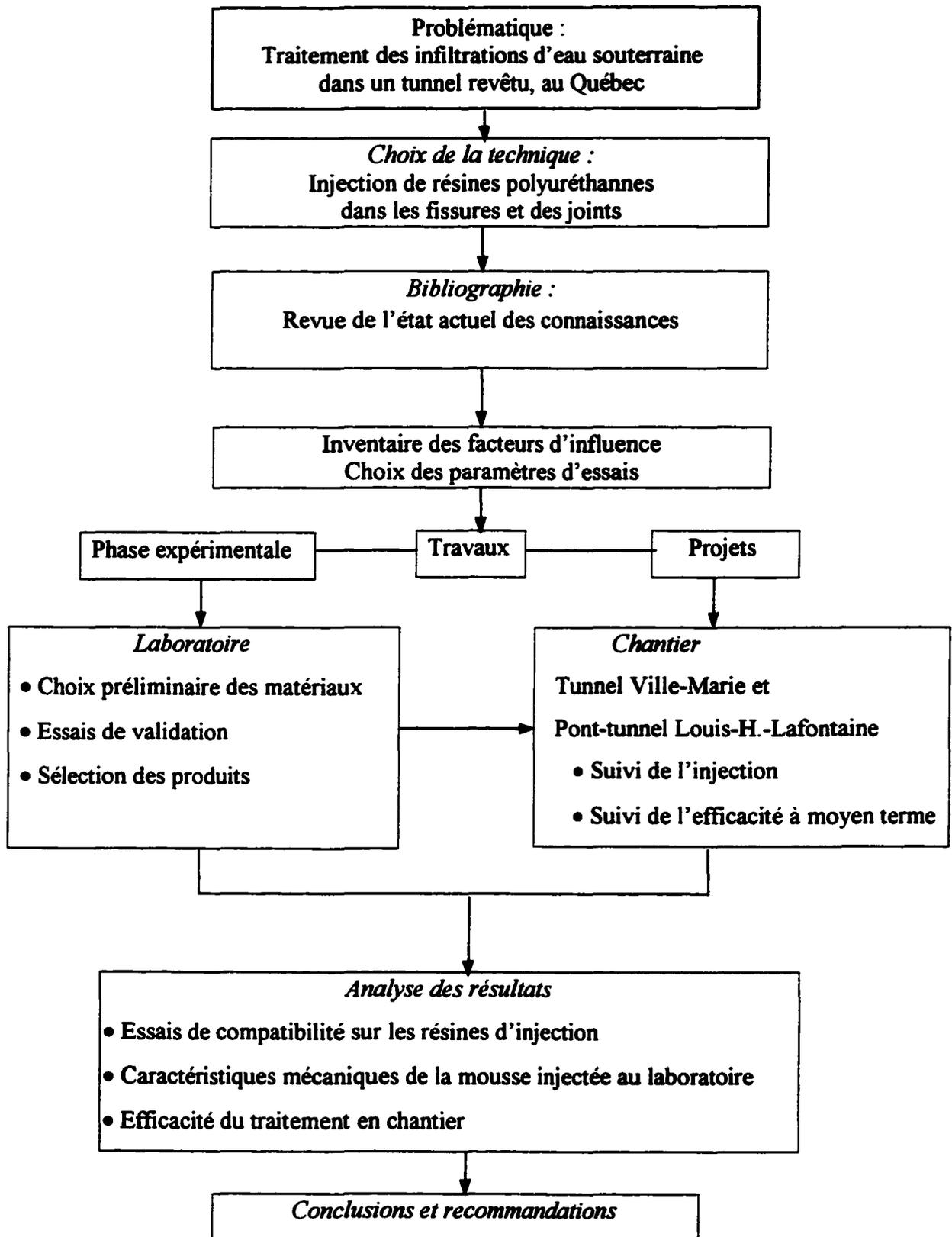


Figure 1.1 Organigramme du déroulement du projet

CHAPITRE 2 : ÉTAT DES CONNAISSANCES

Ce chapitre présente tout d'abord la problématique du contrôle des infiltrations d'eau dans un tunnel et passe en revue les diverses techniques de traitement des infiltrations dans les ouvrages souterrains, dont les alternatives à la technique d'injection. Il poursuit par la présentation de l'effet des variations de la température sur les mouvements des structures. Enfin, il présente la définition et les propriétés des résines polyuréthannes et décrit les principes de la technique d'injection à la résine polyuréthane.

2.1 Traitements des infiltrations d'eau dans les tunnels

2.1.1 Choix du traitement

Le contrôle de l'infiltration d'eau dans un tunnel est un procédé complexe et beaucoup d'éléments doivent être pris en compte. Selon RUSSELL [1997], la solution retenue doit être spécifique à chaque site. Aussi, le choix du traitement des venues d'eau dans un tunnel en service dépend de plusieurs facteurs. Tout d'abord, il doit être choisi en fonction des caractéristiques de l'ouvrage, de son ancienneté et de son état général. L'âge et les infiltrations d'eau souterraines sont, en effet, les problèmes les plus sérieux qui affectent l'intégrité structurale des tunnels [RUSSELL et coll. , 1993]. Il faut aussi tenir compte des paramètres extérieurs, de la température et de la pluviométrie par exemple. Enfin, le type et la localisation des venues d'eau ont aussi une incidence sur le type de traitement. Si les venues d'eau influent sur la sécurité du trafic (Fig. 2.1), sur les équipements ou sur le travail du personnel, on cherchera des degrés différents d'efficacité. De plus, si les venues d'eau sont diffuses ou sont bien localisées, la solution à retenir sera différente.

Carambolage sur l'autoroute Ville-Marie

■ Un carambolage impliquant 10 véhicules s'est produit vers 15h hier sur l'autoroute Ville-Marie en direction est, mais l'accident n'a fait aucun blessé grave. Depuis hier matin, deux des voies de l'autoroute étaient fermées en raison d'un gonflement d'asphalte dû à une infiltration d'eau dans le tunnel Ville-Marie. Selon le ministère des Transports, l'accident pourrait avoir été causé par deux automobilistes qui ont tenté de s'engager en même temps dans la même voie, mais la SQ se contentait hier de parler de vitesse excessive combinée à une chaussée glissante. Le tunnel Ville-Marie a complètement été fermé à la circulation jusqu'à 18h30, heure à laquelle on l'a de nouveau ouvert après avoir remédié au gonflement d'asphalte.

Figure 2.1 Article : cas d'infiltration d'eau portant atteinte à la sécurité routière (source : La Presse, Montréal, dimanche 3 janvier 1999)

2.1.2 Principaux types de traitements

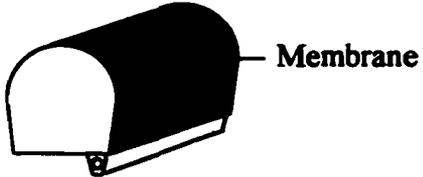
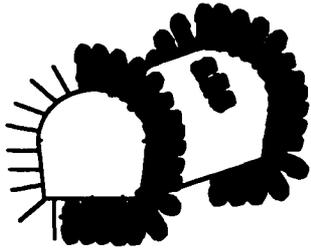
On distingue généralement trois principaux types de traitement contre les venues d'eau : le captage-drainage, l'imperméabilisation et l'injection (Tableau 2.1).

- Le captage consiste à recueillir les venues d'eau très ponctuelles le long des joints par exemple. Le drainage permet de concentrer des venues d'eau ponctuelles ou non vers une même zone, puis à les diriger vers un collecteur.
- L'imperméabilisation concerne le cas des venues d'eau diffuses : on imperméabilise la surface du tunnel à l'intrados par un enduit ou une membrane étanche.

- La technique d'injection peut être réalisée soit à l'extrados du revêtement, soit dans la masse même du revêtement, dans les fissures, les joints ou les nids d'abeille.

Il existe aussi d'autres techniques particulières, comme par exemple la technique dite « des tôles parapluies » qui permet de dévier l'eau du plafond vers les piédroits, à l'aide de tôles fixées à la voûte du tunnel.

TABLEAU 2.1 TROIS PRINCIPAUX TYPES DE TRAITEMENT CONTRE LES INFILTRATIONS D'EAU DANS UN TUNNEL EN SERVICE

Traitement	Type d'étanchéité	Schéma de principe
CAPTAGE-DRAINAGE	Au niveau des joints	 <p>Dalot et drain Collecteur principal</p>
IMPERMÉABILISATION	Continue	 <p>Membrane</p>
INJECTION	Au niveau des joints et des fissures (post-injection)	

Enfin, il est aussi possible de résoudre le problème d'infiltration dans un tunnel en cherchant à bloquer l'eau directement à la source. Dans ce cas, une étude hydrogéologique et un rabattement de nappe peut s'avérer une solution très efficace. Dans le cas où le tunnel est situé en milieu urbain, la réparation d'un aqueduc brisé ou d'un réseau d'assainissement de l'eau défailant peut, par exemple, définitivement résoudre le problème.

2.1.3 Avantages et inconvénients liés à chacune des méthodes

Les techniques de captage et de drainage combinées ensemble sont efficaces dans le cas où les infiltrations sont bien localisées et que le volume d'eau drainé est significatif. C'est une solution qui est bien adaptée aux cas des tunnels revêtus, lorsque les venues d'eau sont concentrées dans des joints de construction ou de dilatation. Cependant, elle s'avère inefficace en cas de venues d'eau diffuses (Photo 2.1), lorsque l'eau suinte simplement au travers de la structure ou encore que le volume d'eau n'est pas assez important. De plus, cette technique ne permet pas de lutter efficacement contre la corrosion et la dégradation du béton. Des dispositions particulières et coûteuses doivent être également prises dans le cas où les drains sont soumis au gel pendant l'hiver. La pose de fils chauffants, voire de matériaux isolants, doit être prévue. Enfin, par manque de place, il n'est pas toujours possible de construire un réseau d'évacuation de l'eau dans les tunnels existants.



Photo 2.1 Fissuration et venue d'eau diffuses au niveau de la voûte d'un tunnel (L.-H.-Lafontaine)

L'imperméabilisation à l'aide d'une membrane est une technique couramment utilisée dans le cas où le tunnel est non revêtu, de courte longueur et lorsque de nombreuses venues d'eau proviennent du massif rocheux encaissant. Elle permet d'assurer une étanchéité continue le long de l'ouvrage. Cette technique est toujours combinée avec le drainage, car les venues d'eau situées

à l'arrière de la membrane doivent être évacuées pour éviter les surpressions. Pour un tunnel important, de grande section et de grande longueur, cette solution s'avérera très coûteuse, mais définitive.

L'injection est une solution à long terme, et c'est la seule solution qui permette de traiter les venues d'eau ponctuelles ou non, et à l'intérieur même du revêtement en évitant ainsi que l'eau ne traverse et ne dégrade le béton. Mais la technique d'injection peut aussi poser quelques difficultés. Le travail s'effectue le plus souvent en aveugle, et on ne sait pas toujours très bien où va le coulis ni comment il se répartit dans la structure. La perte de coulis peut alors être significative. Les venues d'eau peuvent aussi se déplacer et réapparaître dans d'autres zones. Enfin, les éléments de drainage peuvent être obstrués : il faut alors les réhabiliter ou les reconstruire.

2.2 Effets des variations de température sur une structure souterraine au Québec

Pour le traitement des infiltrations d'eau dans un tunnel situé au Québec, il est indispensable de connaître et de tenir compte des mouvements saisonniers des fissures et des joints dus aux variations importantes de la température. Dans cette partie, un rappel de l'effet des variations de température sur le béton est présenté. Ce projet concernant le traitement des infiltrations d'eau dans deux tunnels situés sur l'île de Montréal, les données climatiques de l'île de Montréal ont été prises comme exemple d'application.

2.2.1 Variations volumétriques du béton

Il est possible d'estimer de façon simple les variations volumétriques du béton dues à la température par l'équation 2.1 :

$$\boxed{\frac{\Delta l}{l} = \alpha \times \Delta T} \quad (2.1)$$

avec : Δl =variation de longueur l =longueur initiale
 ΔT =variation de température α = coefficient de dilatation thermique

Le coefficient de dilatation thermique (α) dépend de plusieurs facteurs. Ainsi, selon KOMATKA [1995], α varie en fonction des caractéristiques des constituants du béton et de facteurs extérieurs, soit :

- **le type de roche** : un béton siliceux aura un coefficient de dilatation thermique ($\alpha=12\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) plus grand que celui d'un béton calcaire ($\alpha=7\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) ;
- **la grosseur des granulats** : plus les granulats sont gros, plus l'influence du type de roche sur la variation volumétrique du béton est grande ;
- **le dosage en ciment** : plus il est fort, plus α sera grand, alors que le type de ciment n'a que très peu d'influence. (un béton de rapport E/C faible aura un coefficient α fort) ;
- **le pourcentage d'agent entraîneur d'air** : plus il est faible (moins d'air), plus α est grand ;
- **la présence d'armatures** : elles tendent à faire augmenter le coefficient de dilatation thermique ;
- **le taux d'humidité relative** : le coefficient de dilatation thermique du béton est maximum pour un taux d'humidité relative compris entre 70 et 80 % et minimum pour 0 et 100 % ;
- **la gamme de température** : on observe que le béton se contracte lors d'un abaissement de la température jusqu'à -5°C , puis se dilate jusqu'à -30°C , lorsque l'eau interstitielle gèle. Lors du réchauffement, il subsiste une légère dilatation résiduelle qui s'atténue avec l'âge.

Le coefficient de dilatation thermique d'un béton normal varie donc généralement entre 6 et $13\times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ et vaut en moyenne $10^{-5} / ^\circ\text{C}$. Pour avoir un ordre de grandeur, cela représente un changement de longueur de 1 mm pour une longueur de 10 m de béton et pour une variation de 10°C .

2.2.2 Données climatiques de l'île de Montréal

Les données climatiques mesurées pendant 20 ans et provenant de stations météorologiques de l'île de Montréal permettent d'établir une moyenne des températures rencontrées sur l'île pendant une année (Tableau 2.2).

La température moyenne durant une année s'élève ainsi à environ 7°C sur l'île de Montréal. Les maxima sont généralement enregistrés au mois de juillet (20°C en moyenne) et les minima au mois de janvier (-10°C en moyenne).

TABLEAU 2.2. MOYENNES DES TEMPÉRATURES MENSUELLES (°C) SUR L'ÎLE DE MONTRÉAL (Source : ministère de l'Environnement, mesures enregistrées entre 1974 et 1993 sur six stations météorologiques)

STATION	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	M. A.
International-A	-10,27	-8,49	-2,77	6,00	13,39	17,78	20,87	19,50	14,39	7,62	1,64	-6,74	6,08
Jardin Botanique	-9,86	-8,05	-0,76	6,31	13,94	18,79	21,89	20,29	14,92	8,30	1,94	-5,88	6,82
Jean Brébeuf	-10,46	-7,08	-1,63	5,96	13,58	18,78	21,78	20,45	14,61	8,21	2,27	-5,65	6,74
Lafontaine	-8,81	-6,57	-1,49	6,93	14,48	19,26	22,37	21,03	15,37	9,04	2,56	-5,35	7,40
Mc Gill	-8,95	-7,03	-1,44	7,20	14,63	19,30	22,30	20,83	15,43	8,97	2,80	-4,99	7,42
Rivière des Prairies	-10,66	-9,12	-3,01	5,82	13,27	18,06	21,01	19,73	14,34	7,75	1,58	-6,99	5,98
Ste Anne de Bellevue	-10,41	-8,36	-2,47	6,20	13,51	18,02	21,02	19,85	14,44	8,03	1,77	-5,86	6,31
Ste-Geneviève	-10,42	-8,73	-2,60	5,82	13,55	17,93	21,18	19,97	14,63	8,12	1,87	-6,62	6,23
Moyennes mensuelles	-9,98	-7,93	-2,02	6,28	13,79	18,49	21,55	20,21	14,77	8,26	2,05	-6,01	6,62
Écart-Type	0,72	0,92	0,80	0,52	0,51	0,61	0,61	0,54	0,43	0,52	0,44	0,71	0,57

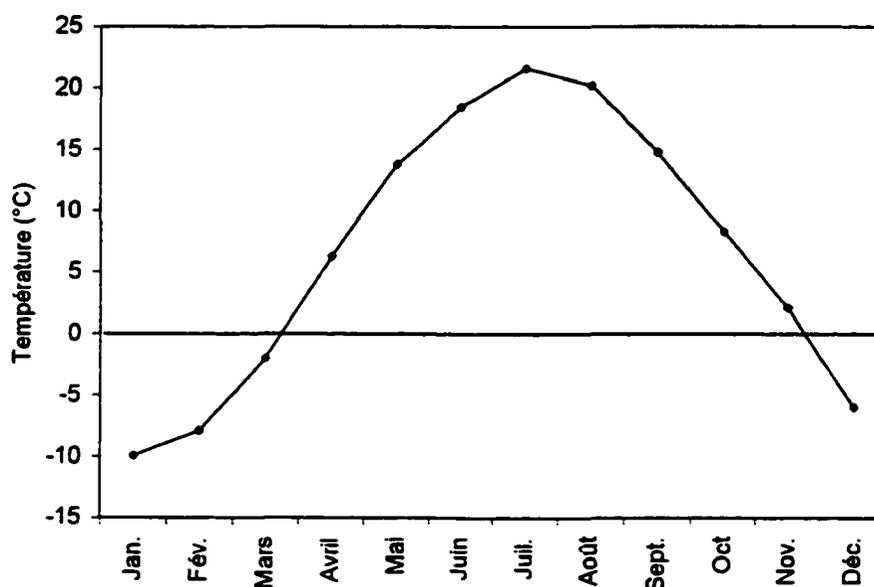


Figure 2.2 Évolution de la température moyenne mensuelle pendant une année sur l'île de Montréal

En première approximation, on retrouve donc chaque année un cycle de température ambiante d'une amplitude de 30 °C (Fig. 2.2).

Pour compléter ces renseignements, un exemple d'instrumentation installée au pont tunnel L.-H.-Lafontaine, pendant l'année 1997, montre le même ordre de grandeur : la température ambiante varie en moyenne de -5°C à +25 °C sur l'année 1997-1998, soit également 30°C d'amplitude (Fig. 2.3).

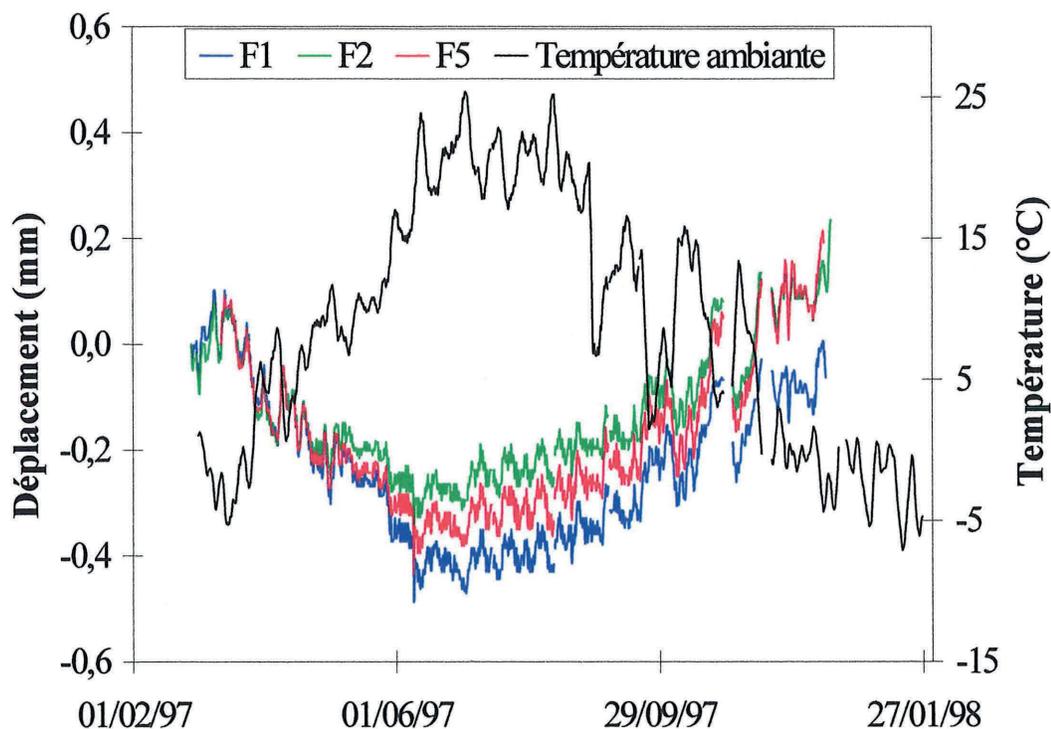


Figure 2.3 Variations de température et mouvements d'un joint de construction (trois fissuromètres F1, F2 et F5) observés pendant une année au pont-tunnel Louis-H.-Lafontaine, cf. Fig. 5.2 p. 104

Cependant, les variations de température au niveau de la structure ne sont pas les mêmes que celles présentes à la surface. L'entrée des véhicules dans le tunnel peut provoquer un refroidissement de la structure, par l'«effet de piston» et la présence constante d'un courant d'air. Mais à l'inverse, le fait que l'ouvrage soit situé en profondeur et, qui plus est, sous l'eau atténue beaucoup les variations de température dans la structure. Aussi, la variation de la température est beaucoup plus faible à l'intérieur du béton qu'à la surface.

Pendant l'hiver, la température ambiante descend à $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, mais dans le béton, la température de la structure descend généralement tout juste à $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Inversement, l'été, si la température ambiante monte à $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, la température de la structure atteint au plus $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pour le calcul suivant, une variation annuelle de température de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ sur la structure a donc été prise en compte.

2.2.3. Application sur un tunnel revêtu au mouvement des joints d'expansion et des fissures

Il est donc possible, par un calcul simple (équation 2.1), d'estimer la variation d'ouverture d'un joint d'expansion dans le cas d'un tunnel revêtu. Ce calcul considère que le béton n'est pas fissuré. Ainsi, si l'on prend un espacement de 15 m entre les joints d'expansion (Fig. 2.4.), comme c'est le cas par exemple du pont-tunnel Louis-H.-Lafontaine, et une variation de température du béton de 20°C, la variation d'ouverture du joint d'expansion vaut :

$$\Delta l = \alpha \times \Delta T \times l$$

$$\Delta l = 10^{-5} \times 20 \times 15 = \underline{3 \text{ mm}}$$

Le joint de dilatation s'ouvre de 3 mm lorsque la température du béton s'abaisse de 20°C à 0°C et se referme de 3 mm lorsque la température remonte à 20°C.

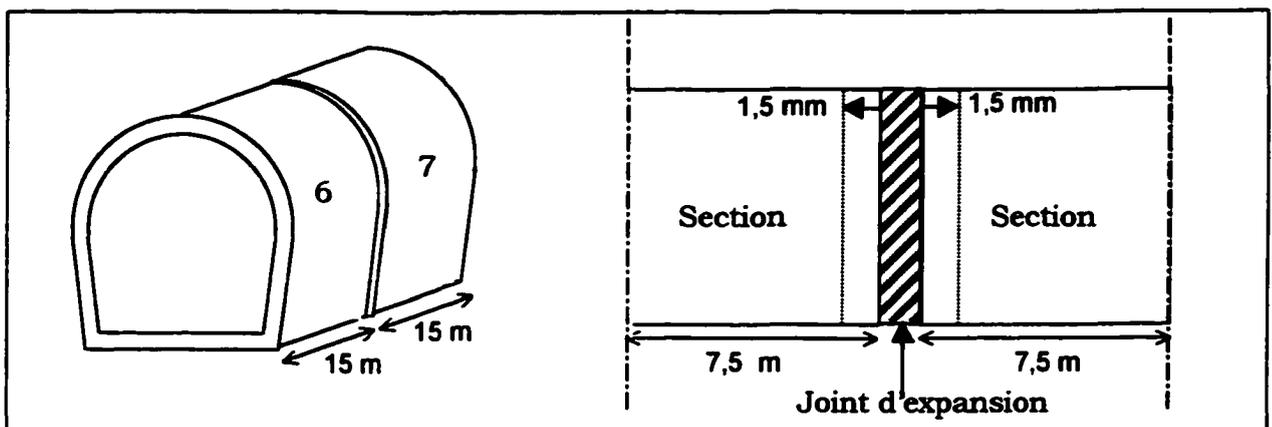


Figure 2.4 Ouverture d'un joint d'expansion lors d'un abaissement de température de 20 °C

Il est difficile d'appliquer ce calcul pour connaître le mouvement réel des fissures, car on ne peut évaluer réellement au cas par cas la longueur de béton concernée. Alors, il est intéressant d'instrumenter la structure à quelques endroits, comme au pont tunnel L.-H.-Lafontaine où des fissuromètres et des thermocouples ont été posés au niveau de joints de construction situés dans la tour de ventilation nord (cf. section 5.2). Le suivi des données pendant une année a montré qu'un changement de température ambiante de 30 °C se traduit par un mouvement de fissure de 0,6 mm (Fig. 2.4). (NB : dans ce type de joint de construction, joint froid entre deux coulées de béton, la longueur de béton concernée est différente de celle prise en compte dans le calcul

précédent, c'est pourquoi les résultats ne sont pas comparables). Aussi, pour la grande majorité, les fissures situées dans le tunnel sont millimétriques. Elles sont quasiment fermées pendant l'été et s'ouvrent d'environ de 1 mm l'hiver. L'ordre de grandeur des mouvements saisonniers des fissures est donc de l'ordre du millimètre.

2.3 Les résines polyuréthannes utilisées pour l'injection d'étanchéité

2.3.1 Définitions

Il faut rappeler tout d'abord la définition d'un coulis d'injection : c'est un produit qui, injecté dans un milieu fissuré ou un sol, change les caractéristiques physiques (résistance ou perméabilité) de la formation. On distingue ainsi trois familles de coulis selon leur état : les suspensions, les liquides et les émulsions (Tableau 2.3).

TABLEAU 2.3 LES DIFFÉRENTES FAMILLES DE PRODUITS D'INJECTION (d'après l'AFTES, Association Française des Travaux en Souterrain)

États	Produits d'injection	
Suspensions	<ul style="list-style-type: none"> • Coulis de ciment <ul style="list-style-type: none"> Ciments conventionnels Ciments microfins ou ultrafins Ciment+ adjuvants Ciment+charge (sable ou gravier par exemple) • Coulis de ciment +bentonite • Coulis de bentonite défloquée 	
Liquides (Coulis chimiques)	Gels de silicates	<ul style="list-style-type: none"> • Gels de silicates durs • Gels de silicates mous (ou dilués)
	Résines organiques	<ul style="list-style-type: none"> • Acrylamides (Acryliques) • Acrylates (polyacrylates) • Phénoplastes • Aminoplastes • Polyuréthannes aquaréactives • Polyuréthannes bicomposantes • Époxydes
Émulsions	<ul style="list-style-type: none"> • Bitume de ciment • Bitume organique 	

ANDERSSON 1995 classe les coulis chimiques en deux familles (Fig. 2.5) : d'une part les solutions aqueuses, c'est à dire les coulis qui se compose de produits chimiques dissous dans de l'eau et qui produisent un gel ; et d'autre part les résines thermodurcissables, c'est à dire les résines produisant un matériau solide qui durci lorsqu'on le chauffe (au contraire de la résine thermoplastique qui fond).

Les résines polyuréthannes aquaréactives font partie des résines thermodurcissables. Elles sont liquides et ne présentent donc aucune particule en suspension. L'injection de résine de polyuréthane consiste à pomper sous pression du polyuréthane. La réaction chimique de ce coulis avec l'eau forme une mousse polyuréthane imperméable dans les fissures, les joints ou les vides de la structure.

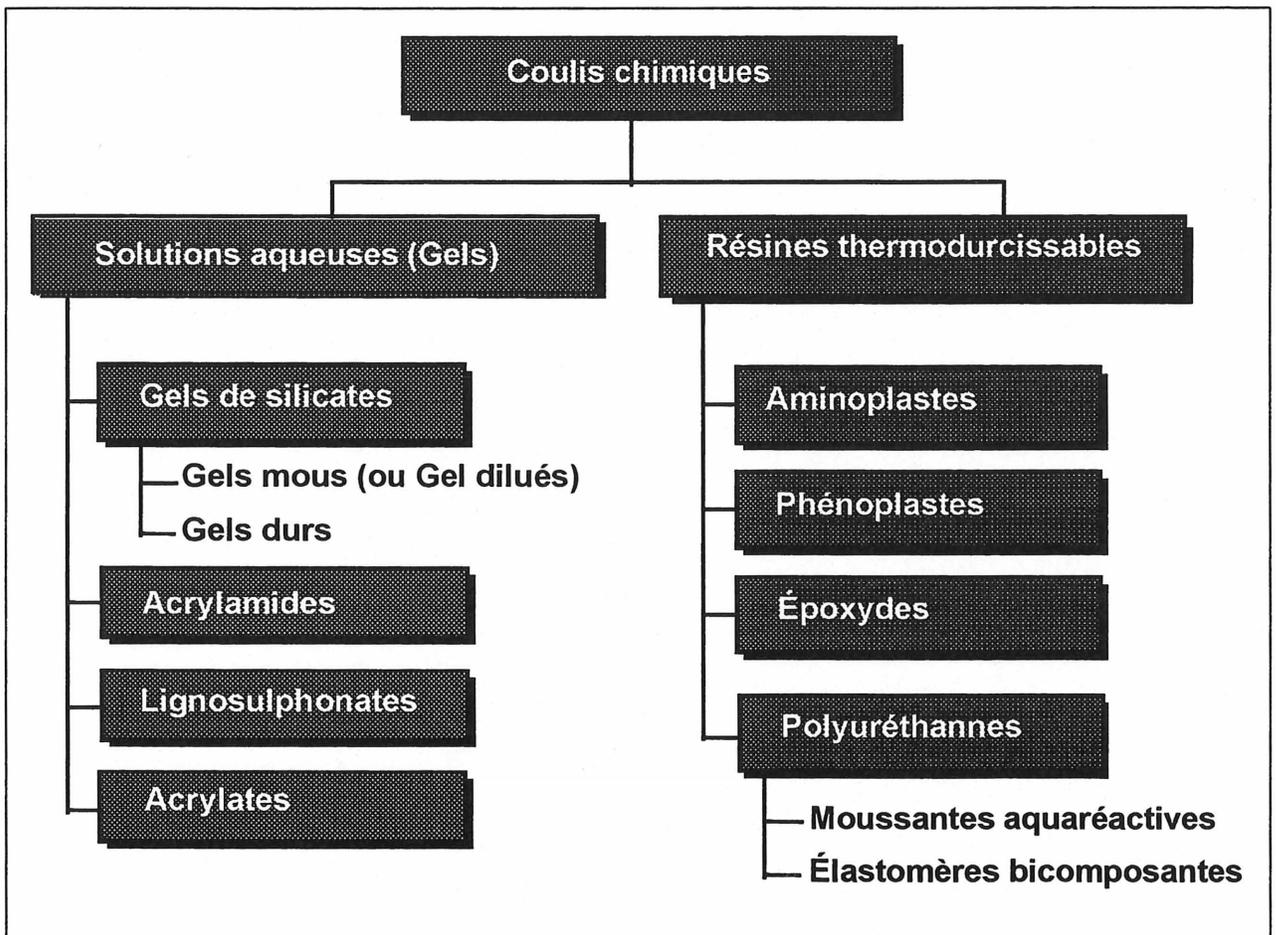


Figure 2.5 Classification des coulis chimiques (d'après ANDERSSON, 1995)

2.3.2 Historique

a) Les débuts du polyuréthane dans l'industrie chimique

La première fonction uréthane a été obtenue à la fin du XIX^{ème} siècle, par addition d'un isocyanate et d'un alcool. Puis, c'est pendant la seconde guerre mondiale que les Allemands et les Américains comprirent l'intérêt du dégagement gazeux produit par la réaction des isocyanates sur l'eau et fabriquèrent les premières mousses rigides destinées à la construction des avions et des sous-marins [HATAT, 1988] . En 1937, Otto Bayer entreprend l'étude de la polymérisation des isocyanates avec les diols et les diamines et, en 1952, la première mousse flexible est fabriquée. De multiples produits ont alors été fabriqués. Aujourd'hui les polyuréthanes constituent l'une des plus vastes familles de plastique. On distingue ainsi :

- les mousses souples, semi-rigides, rigides ou rigides à haute densité ;
- les élastomères thermodurcissables ou thermoplastiques ;
- les gels ;
- les fibres textiles ;
- les peintures et les vernis ;
- les colles et les liants.

b) Les résines polyuréthanes utilisées pour l'injection

Alors que les autres coulis chimiques sont utilisés depuis longtemps, (1886, pour les gels de silicate), il faut attendre 1967 pour voir la première mise en œuvre d'une résine polyuréthane pour effectuer des travaux d'injection. Il s'agit du *TACSS*, développé par la société japonaise Takenaka Komunen Ltd. et utilisé pour étancher un ouvrage hydraulique. C'était le premier produit à avoir la particularité d'utiliser l'eau en place comme réactif [KAROL, 1990]. Ce même produit fut ensuite utilisé en Europe pendant une quinzaine d'années et sept ans aux États-Unis. Puis, en 1978, la société 3M a commencé la commercialisation de nouveaux coulis de polyuréthane, principalement pour la réhabilitation des conduites d'égouts. Voyant le succès de ces réhabilitations, les fabricants se sont mis à développer très rapidement de nouveaux produits.

Aujourd'hui, l'injection à la résine polyuréthane est une technique éprouvée dans plusieurs domaines. Elle est utilisée pour colmater des fissures ou des venues d'eau et étancher des joints de construction ou de dilatation. On l'utilise également pour consolider ou stabiliser des fondations (sol ou massif rocheux), prévenir des mouvements de structures ou remplir des cavités derrière les parois d'un tunnel, d'un mur de maçonnerie ou sous des dalles.

c) Historique des travaux réalisés sur l'injection au Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée de l'Université de Sherbrooke

Au Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, ce travail de recherche vient à la suite de l'ensemble des études menées sur les techniques d'injection au cours des dernières années par plusieurs étudiants. En 1980, les premières études concernaient l'injection d'ancrages au rocher ou la réalisation du voile d'étanchéité sous les barrages. D'autres projets de recherche ont ensuite traité du comportement des coulis pour l'injection dans les milieux fissurés et de la formulation de coulis pour l'injection, dans le cas de stockage de déchets nucléaires, dans les sols fins ou dans les ouvrages à caractère historique. Enfin, les études sur l'injection des résines organiques, comme le polyuréthane, se sont ajoutées ces dernières années, avec SEBBAGH [1995], qui a étudié le comportement de résines polyuréthanes dans le but d'injecter des lames d'étanchéité dans des barrages. Ce projet vient donc compléter l'application de la technique d'injection en utilisant les résines polyuréthanes dans le cas de l'étanchéité des tunnels soumis à des variations de température importantes.

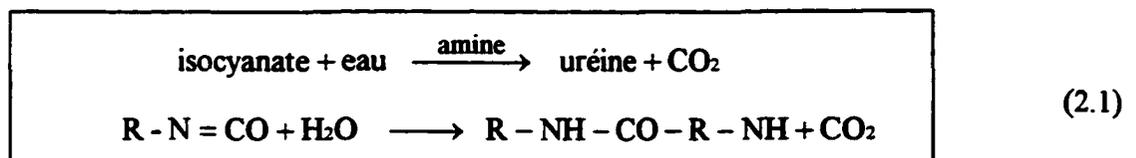
2.3.3 Réactions chimiques

a) Réaction d'expansion et réaction de polymérisation

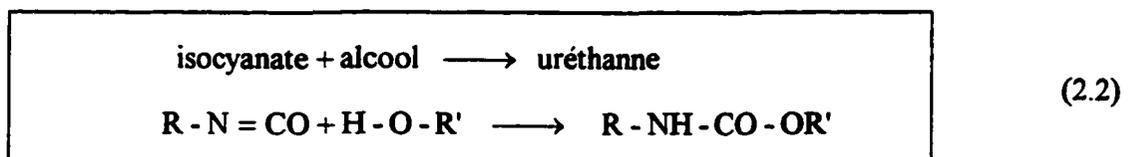
Les résines polyuréthanes utilisées pour l'injection appartiennent à deux familles de polyuréthane : elles produisent soit des mousses, soit des élastomères. On les appelle ainsi des « résines moussantes » ou des « résines élastomères ». Les mousses ou les élastomères polyuréthanes sont issus de la polymérisation d'un isocyanate et d'un polyol, en présence d'eau ou non, la réaction étant contrôlée par des catalyseurs du type amine et des agents tensioactifs.

Deux réactions sont ainsi à la base de la formation du polyuréthane : la réaction d'expansion et la réaction de polymérisation.

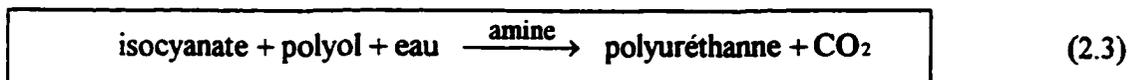
La réaction d'expansion provient de la réaction de l'isocyanate avec l'eau, qui produit un composant de type urée et un dégagement de CO₂. Cette réaction (2.1) est exothermique et est activée par les amines et également par la chaleur. C'est la génération du CO₂ qui produit le phénomène d'expansion et qui fabrique la structure alvéolaire du polyuréthane.



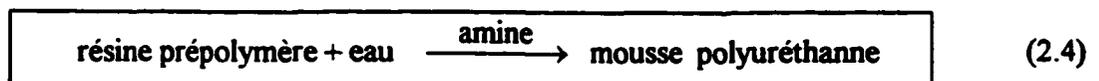
La deuxième réaction est la réaction de polymérisation (réaction 2.2), qui implique la réaction d'un composant de type isocyanate (polyisocyanate) avec un composant de type alcool (polyol). Cette réaction produit la fonction uréthane et fabrique la structure rigide ou flexible du polymère, selon le type de polyol utilisé.



Ainsi, une résine est moussante lorsque la polymérisation met en jeu à la fois l'isocyanate, le polyol et l'eau (réaction 2.3).



En fait, dans le cas des résines moussantes : un seul composant réagit directement au contact de l'eau pour former une mousse parce qu'il contient à la fois les fonctions isocyanate et polyol. C'est pourquoi les résines moussantes sont aussi appelées sous les termes suivants : résines monocomposantes, résines prépolymères ou encore résines aquaréactives. Avec l'ajout d'un accélérateur (type amine), la polymérisation commence sitôt que la résine prépolymère entre en contact avec l'eau (réaction 2.4) :



A la différence des résines moussantes, les élastomères sont issus de la réaction de deux composants distincts : un composant A, du type isocyanate et un composant B du type polyol. De plus, dans le cas des résines élastomères, Il n'y a pas de réaction avec l'eau, donc pas de production de CO_2 , ni d'expansion et le produit formé n'est pas alvéolaire. Les résines élastomères nécessitent donc le mélange de deux composants près du point d'injection ; elles sont aussi appelées résines bicomposantes.

b) Principales étapes de la réaction

La courbe d'expansion de la mousse (Fig. 2.6) montre les différentes étapes de la réaction de la résine polyuréthane aquaréactive.

Le temps de crème (A) correspond au moment où le mélange, translucide initialement, devient crémeux : c'est le début de la production de CO_2 et de l'expansion de la mousse. (réaction 2.1)

Au temps de fil (B), la réticulation ou polymérisation commence (réaction 2.2). Le point C est le temps où la mousse atteint sa hauteur maximale ; c'est le temps de montée ou d'expansion. L'intervalle de temps A à C est ainsi la période d'expansion du polyuréthane.

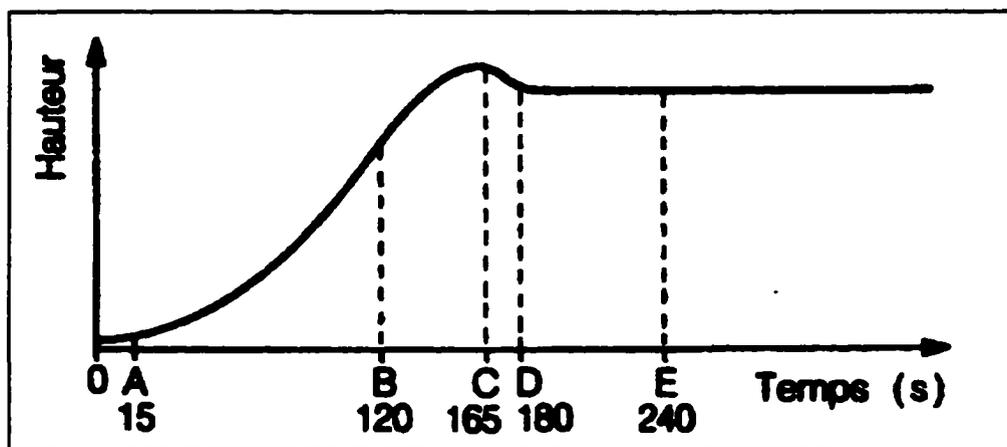


Figure 2.6 Courbe type d'expansion d'une mousse polyuréthane (d'après HATAT, 1988)

Au point **D**, appelé temps d'ouverture des cellules, les mousses souples ou semi-rigides voient leurs cellules s'ouvrir, « elles respirent ». La hauteur de la mousse retombe légèrement et se stabilise.

Enfin au temps hors poisse (**E**), la mousse ne colle plus au doigt. Pour certaines résines, la réaction ne sera complétée qu'au bout de quelques jours. On considère que le temps hors poisse correspond au temps de réaction final. Cependant, dans la pratique, il est plus facile de mesurer ces paramètres lorsque l'on considère que c'est le début de l'expansion (point **A**) et la fin de l'expansion (point **C**) qui correspondent respectivement au temps de réaction initial (**TI**) et au temps de réaction final (**TF**).

c) Contrôle du retrait après la réaction

Pendant la réaction, un léger retrait peut se produire **C à D** (Fig. 2.6). Ce phénomène est dû au fait que les parois des cellules sont très perméables au CO_2 (plus qu'à l'air). Aussi, à la fin de la réaction, les cellules se vident de leur contenu gazeux, ce qui entraîne la rétractation des mousses souples en formation. Le phénomène ne se produit pas pour les mousses rigides, puisque le squelette est suffisamment solide pour éviter la rétractation lorsque le CO_2 s'échappe. Pour éviter ce retrait, dans le cas des mousses souples ou semi-rigides, les cellules doivent rester fermées pendant l'expansion, puis s'ouvrir en fin de réaction pour permettre le remplacement du CO_2 par l'air et éviter la rétractation de la mousse. C'est le rôle des agents tensioactifs. Ceux-ci doivent être particulièrement bien dosés pour minimiser le retrait juste après la réaction.

2.3.4 Propriétés des résines polyuréthannes

JOYCE, [1992] distingue trois actions de la mousse polyuréthane injectée dans une fissure :

- une action chimique, par adhérence de la mousse sur le béton ;
- une action physique, par ancrage de la mousse dans les pores et les vides du béton ;
- une action mécanique, par pression de la mousse expansive dans la fissure.

Pour expliquer le fonctionnement de la mousse injectée dans une fissure, les principales propriétés des résines polyuréthannes aquaréactives sont donc expliquées.

a) Comportement avec l'eau : hydrophobe ou hydrophile

On distingue deux types de mousse polyuréthane selon leur comportement avec l'eau : les mousses hydrophiles et les mousses hydrophobes. Les mousses hydrophobes n'absorbent pas l'eau, tandis que les mousses hydrophiles sont capables de l'absorber, telle une éponge. C'est le type d'isocyanate utilisé dans la réaction qui donne à la mousse polyuréthane la propriété d'être hydrophobe ou hydrophile. La mousse hydrophile est issue de la réaction d'un isocyanate du type TDI (pour Toluène Diisocyanate), alors que la mousse hydrophobe est issue de la réaction d'un isocyanate du type MDI (pour diphenyle Méthane Diisocyanate). Selon HEPBURN [1992] le type d'isocyanate utilisé est potentiellement moins toxique dans le cas d'un hydrophobe (MDI) que dans celui d'un polyuréthane hydrophile (TDI).

TABLEAU 2.4 COMPARAISON DES PROPRIÉTÉS DES RÉSINES HYDROPHOBES ET HYDROPHILES

Propriétés	Hydrophobe	Hydrophile
Adhérence aux surfaces humides	Mauvaise	Bonne
Structure du produit final	Indépendante de la quantité d'eau	Dépendante de la quantité d'eau
Vitesse de réaction	Très rapide	Rapide
Expansion (libre)	10 à 30 fois	5 à 8 fois
Stabilité volumétrique aux cycles gel-dégel et de mouillage-séchage	Bonne	Mauvaise
Stabilité volumétrique après la réaction	Bonne	Mauvaise
Technique d'injection	Simple (résine seule)	Double (résine + eau)

Le paragraphe suivant et le tableau 2.4 décrivent les principales différences de comportement entre les deux types de résine, en s'appuyant notamment sur les travaux de SEBBAGH [1995] qui a réalisé une série d'essais sur 17 résines polyuréthannes.

- Les hydrophiles

Les polyuréthannes hydrophiles présentent l'avantage de bien adhérer au béton humide, mais les inconvénients d'avoir une mauvaise durabilité et une mauvaise stabilité volumétrique aux cycles de gel-dégel et de mouillage-séchage.

En effet, la résine hydrophile a beaucoup d'affinité avec l'eau et nécessite beaucoup d'eau pour faire sa réaction. Lorsque la résine réagit au contact du béton humide, elle cherche à absorber un maximum d'eau présente dans le béton. Ainsi, la mousse formée pénètre dans les pores et les microfissures du béton, ce qui lui donne une assez bonne adhésion au béton humide. Les cellules de la mousse obtenue sont ouvertes, c'est pourquoi la mousse absorbera l'eau qui vient à son contact. Lorsque la mousse est saturée, elle forme une barrière imperméable à l'eau.

Mais SEBBAGH conclut que les résines hydrophiles se comportent très mal face à 300 cycles de gel-dégel et de mouillage-séchage. La mousse étant à cellules ouvertes, l'eau pénètre facilement dans les bulles et gèle, ce qui a pour effet de rigidifier la mousse, voire de la rendre poreuse. Aussi, les variations de la masse et surtout les variations du volume sont très importantes dès les premiers cycles (100%) , ce qui conduit à une mauvaise stabilité de la mousse à long terme.

Un autre inconvénient d'une mousse hydrophile est que sa structure dépend beaucoup de la quantité d'eau présente durant la réaction. L'eau en excès reste dans les cellules de la mousse et si le matériau sèche, il y a un risque de retrait.

Enfin, du point de vue pratique, sur le chantier, l'injection d'une résine hydrophile doit être couplée avec l'injection d'eau pour s'assurer que la résine aura suffisamment d'eau pour réagir. L'ajustement est difficile dans le cas de fissures présentant de fortes venues d'eau, puisque l'on ne sait pas réellement la quantité d'eau qui va être utilisée pour la réaction.

• Les hydrophobes

Au contraire, les polyuréthanes hydrophobes présentent l'avantage d'être très stables aux cycles de gel-dégel et de mouillage-séchage, mais l'inconvénient d'avoir une assez faible adhérence au béton humide.

Ces polyuréthanes n'ont pas d'affinité avec l'eau, la résine n'ayant besoin que de très peu d'eau pour réagir, seule l'humidité du milieu injecté suffit. Lorsqu'elle est injectée dans une fissure humide du béton, la mousse cherche ainsi à repousser l'eau présente dans la fissure. Cette eau

résiste à la pénétration de la résine, ce qui explique la faible adhérence de la mousse au béton humide.

Par contre, dans ce cas, la réaction de la résine et de l'eau produit une mousse à cellules fermées. Cela explique que la mousse n'absorbe pas d'eau. De ce fait, et selon SEBBAGH [1995], les résines hydrophobes ont généralement un bon comportement aux cycles de gel-dégel et de mouillage-séchage, leur volume est pratiquement stable et la qualité de la mousse n'est que très peu affectée par le gel-dégel.

Pendant l'injection d'une résine hydrophobe, la quantité d'eau utilisée pour la réaction étant très faible, la technique consiste à réaliser un essai d'eau préalablement à l'injection de la résine : l'eau présente dans la fissure suffira à faire réagir la résine. La méthode est donc facile et la mousse produite est quasi uniforme, quelle que soit la quantité d'eau présente dans le milieu injecté.

b) Propriétés mécaniques de la mousse

On distingue généralement trois types de mousse polyuréthane selon leur déformabilité : les mousses flexibles (ou mousses souples), les mousses semi-rigides (ou semi-flexibles) et les mousses rigides.

Plusieurs facteurs influencent la structure de la mousse (tableau 2.5). Ainsi, la mousse flexible est produite principalement par les polyols de type polyéther. Elle est d'autant plus flexible que la fonctionnalité des polyols et des isocyanates est faible, et que la chaîne moléculaire du polyol est longue et peu ramifiée.

TABLEAU 2.5 FACTEURS INFLUENÇANT LA RIGIDITÉ DE LA MOUSSE

Caractéristiques	Flexible	Semi-rigide	Rigide
Fonctionnalité du polyol et de l'isocyanate	Faible		Élevée
Longueur de la chaîne du polyol	Longue		Courte
Liaisons intermoléculaires	Peu nombreuses		Très nombreuses
Ramification de la chaîne	Peu ramifiée		Très ramifiée
Réticulation	Faible		Forte
Type de polyol	Polyéther		Polyester

c) Propriétés de la réaction

Les trois principales propriétés résultant de la réaction de la résine sont liées à son aquaréactivité, à son expansion et à la vitesse de la réaction.

- **Aquaréactivité des résines**

Dans le domaine de l'injection d'étanchéité, il est facile de voir l'avantage d'un produit aquaréactif. Alors que, dans le cas de plusieurs autres produits d'injection, la présence d'eau peut nuire à l'injection par dilution, lessivage ou extrusion du coulis, au contraire, les résines polyuréthanes aquaréactives utilisent l'eau pour former la barrière imperméable.

- **Expansion des résines**

La résine augmente de volume de cinq fois son volume initial, en condition confinée, à 30 fois, en expansion libre. D'une part, cette propriété permet de développer dans la fissure une pression due à la production de gaz, qui s'ajoute à la pression d'injection [ANDERSSON, 1998], et permet donc au coulis de se déplacer très loin. D'autre part, si le milieu injecté est confiné, une pression se maintient après l'injection.

Économiquement aussi par rapport aux coulis non expansifs, la résine moussante présente l'avantage d'occuper un plus grand volume à moindre coût, la mousse finale obtenue étant constituée principalement d'air (80% et 97% d'air pour des taux d'expansion respectifs de cinq et 30).

- **Vitesse de réaction des résines**

La réaction est très rapide (quelques secondes à quelques minutes) et surtout réglable par ajout d'un certain pourcentage d'accélérateur.

Les temps de réaction initial (TI) et final (TF) doivent être suffisamment courts pour éviter la perte de coulis, soit par lessivage ou extrusion lorsque la pression d'eau est élevée, soit tout simplement par gravité. LA PENTA [1992] suggère ainsi de doser le pourcentage d'accélérateur de façon à ce que le temps de prise soit égale aux trois quarts du temps mis par l'eau pour

refouler lors des essais d'eau. Mais il faut aussi que le temps de réaction (TF-TI), c'est-à-dire la période d'expansion de la mousse soit assez long pour permettre à la mousse de se déplacer au maximum dans toute la fissure.

Il s'agit donc de doser correctement le pourcentage d'accélérateur pour laisser le temps au coulis de remplir tous les vides, mais sans que la perte de coulis soit importante. Il faut également respecter les limites imposées par les fiches techniques (généralement 1 à 10 %) et ajuster ce pourcentage selon les phases d'injection.

d) Injectabilité et rhéologie

Deux modèles rhéologiques permettent de représenter les coulis d'injection : le modèle de Newton et le modèle de Bingham (Fig. 2.7). Rappelons tout d'abord deux définitions :

- le seuil de cisaillement τ_0 est défini comme la contrainte minimale nécessaire à la mise en mouvement du fluide soumis à une contrainte de cisaillement ;
- la viscosité plastique η est la propriété d'un fluide à produire une résistance au cisaillement ou à l'écoulement lorsque soumis à une contrainte de cisaillement et correspond à la résistance interne du fluide.

Pour les résines polyuréthanes qui suivent le modèle de Newton, la contrainte de cisaillement est directement proportionnelle au taux de cisaillement (Équation 2.2), alors que pour les coulis de ciment répondant au modèle de Bingham, il existe un seuil de cisaillement (Équation 2.3).

La viscosité plastique des résines polyuréthanes est plus élevée que celle des coulis de ciment (Tableau 2.6). SEBBAGH [1995] montre aussi que la température influence beaucoup la viscosité des polyuréthanes. Celle-ci est généralement 1,5 fois plus élevée à 15°C qu'à 23°C et 3 fois plus élevée à 5°C qu'à 23°C.

En comparaison, à 5°C, l'eau possède une viscosité (1,519 cP) qui n'est même pas le double de celle à 25°C (0,894 cP).

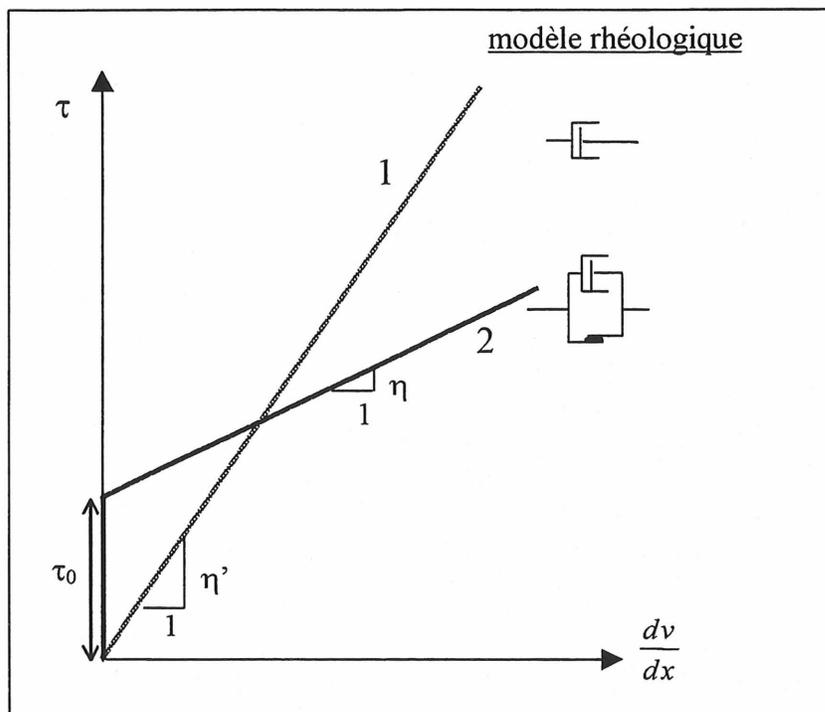


Figure 2.7 Comparaison de la rhéologie d'un fluide Newtonien et Binghamien (d'après LOMBARDI, 1985)

Légende :

- τ_0 : seuil de cisaillement
- η : viscosité plastique
- v : vitesse de cisaillement
- τ : contrainte de cisaillement
- $\frac{dv}{dx}$: taux de cisaillement

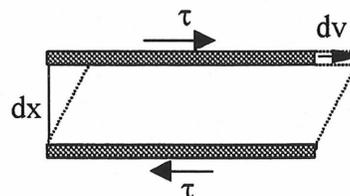


TABLEAU 2.6 COMPARAISON DE LA VISCOSITÉ DE QUELQUES PRODUITS COURANTS ET DES COULIS D'INJECTION

Produit	Modèle	Viscosité (cP) À 23 °C	Seuil (Pa)
Acétone	Newton	0,3	0
Eau	Newton	1	0
Huile végétale	Newton	150	0
Résines polyuréthannes	Newton	100 à 1000	0
Miel	Newton	3000	0
Coulis de ciment	Bingham	5 à 100 *	5 à 20

* dépend surtout du rapport E/C

LIU [1981] définit aussi une propriété spécifique aux résines polyuréthannes prépolymères. Il fait la distinction entre la pénétration primaire, due à la pression d'injection, et la pénétration secondaire, due expansion de la mousse.

Durant la pénétration secondaire, l'injectabilité du coulis est très bonne et le coulis est capable de pénétrer des fissures très fines. Selon LIU, cela est dû au fait que la viscosité du gaz est beaucoup plus faible que celle d'un liquide. Ensuite, à mesure que la polymérisation progresse, la viscosité augmente très rapidement jusqu'à la formation de la mousse [ANDERSSON, 1998 et LIU, 1981].

Pour l'injection dans une fissure, LOMBARDI [1985] a montré que le seuil de cisaillement détermine la distance maximum que le coulis peut parcourir dans la fissure, alors que la viscosité plastique détermine la vitesse d'injection, le temps nécessaire à l'injection complète et le débit d'injection. Or, contrairement au coulis de ciment, les résines polyuréthannes, comme tous les coulis chimiques, n'ont pas de seuil de cisaillement. Il en résulte qu'il n'y a pas de pression minimale à fournir pour mettre en mouvement la résine, ni de limite à la pénétrabilité du coulis dans la fissure. Par contre, la viscosité est plus forte et la durée de l'injection peut être supérieure à celle d'un coulis de ciment.

Coulis	Gravier	Sable			Silt	Argile
		Grossier	Fin	Ultrafin		
Ciment	ciment microfin					
Ciment + argile						
Gel silicate de soude dur						
Gel silicate de soude semi dur						
Résine						
Perméabilité (m/s)	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴		10 ⁻⁵	10 ⁻⁶
Particules (mm) de sol	2	0,5	0,25		0,074	

Figure 2.8 Comparaison de l'injectabilité dans les sols des résines et des autres coulis d'injection (d'après KAROL, 1990 et BENHAMOU, 1994)

Pour l'injection d'un coulis de ciment, il est primordial d'étudier l'injectabilité parce que les particules en suspension peuvent se bloquer dans les fines fissures. Par contre, les résines polyuréthanes ne contiennent aucune particule de dimension mesurable : elles sont liquides et sont considérées comme des coulis où l'injectabilité est idéale. Il n'y a donc quasiment pas risque de ressuage, de ségrégation ou de blocage des particules . Elles sont aussi capables de pénétrer dans des milieux de perméabilité à l'eau faible, jusqu'à 10^{-5} m/s (Fig. 2.8).

Pour conclure sur les propriétés des résines polyuréthanes, le tableau 2.7 fait la comparaison des propriétés des résines polyuréthanes aquaréactives et des coulis de ciment.

TABLEAU 2.7 COMPARAISON DES PROPRIÉTÉS DES RÉSINES POLYURÉTHANNES ET DES COULIS DE CIMENT

Propriétés	Résine polyuréthannes	Coulis de ciment
État	Liquide	Suspension
Réaction avec l'eau	Aquaréactif Hydrophobe ou Hydrophile	Pas de réaction avec l'eau
Déformabilité	Flexible Semi flexible Rigide	Non déformable
Stabilité de la résine et du coulis	Pas de ressuage, ni de ségrégation Ni de lessivage	Possibilité de ressuage statique ou forcé, de ségrégation et de lessivage si non adjuvanté
Densité du produit final (g/cm³)	0,03 (Expansion 30) à 0,3 (Expansion 3)	1,4 (E /C = 5) à 1,8 (E/C = 0,5)
Injectabilité	Fissure : grossière à très fine Sol : gravier à sable silteux Milieu de perméabilité >10 ⁻⁵ m/s	Fissure : Grossière à fines Sol : Gravier à Sable fin (ciment microfin) Milieu de perméabilité >10 ⁻² m/s (10 ⁻⁴ pour ciment microfin)
Vitesse de réaction	Rapide (quelques secondes à quelques minutes) Réglable	Lente (Quelques heures)
Expansion (libre)	Mousse : 5 à 30	0, voire 1 à 2 % (si agent expansif)
Comportement Rhéologique	Newtonien 	Binghamien 
Viscosité plastique (cP)	50 à 1000	5 à 50
Seuil de cisaillement (Pa)	0	5 à 20
Type de réparation	Non structurale	Structurale

2.3.5 Critères de sélection des résines polyuréthannes

L'emploi des résines d'injection de polyuréthane étant relativement récent, les méthodes et les critères de sélection de ces résines sont très peu nombreux. Quelques auteurs et chercheurs ont fixé des critères de sélection pour des applications d'injection de résines polyuréthannes. En 1970, soit au début de l'utilisation des polyuréthannes comme résine d'injection, VINSON élabore des formulations de résines polyuréthannes pour injecter les sols lunaires et fixe les premiers critères sur la sélection des résines d'injection. En Suède, ANDERSSON [1998] reprend certains critères donnés par VINSON pour tester des résines produisant des mousses rigides dans le cas de l'injection de fissures au rocher, en Suède. Mais elle s'intéresse surtout à la réaction d'expansion de la mousse, à la production de CO₂ et à la structure finale de la mousse obtenue, et non à ses propriétés mécaniques. Les critères de sélection de VINSON et de ANDERSSON sont :

- le taux d'expansion de la mousse doit être indépendant de la quantité d'eau ;
- le taux d'expansion de la mousse doit être constant dans le temps ;
- la mousse doit posséder des bulles de taille uniforme ;
- la quantité de résine qui n'a pas réagi à la fin de l'expansion doit être minimale ;
- la mousse doit être rigide, de haute résistance et non friable.

TABLEAU 2.8 CARACTÉRISTIQUES D'UN POLYURÉTHANNE « IDÉAL » (d'après KAROL, 1990)

Résine	Mousse
1) De basse viscosité, proche de celle de l'eau	1) Obturation permanente
2) Stable, sous les températures normalement rencontrées en souterrain	2) Insensible aux agents agressifs rencontrés dans les zones injectées
3) Non toxique, non-corrosif, non explosif	3) Non toxique, non corrosif, non explosif
4) Catalysée à partir de composants chimiques communs, économiques et remplissant les critères 2 et 3	4) De « haute résistance »
5) Insensible aux agents agressifs rencontrés dans les zones injectées	
6) Stable à un pH basique (béton)	
7) Capable de résister au lessivage par l'eau	

KAROL [1990] énumère les caractéristiques idéales que doit posséder un coulis chimique au sens large. Il distingue les caractéristiques de la résine, c'est à dire le coulis avant d'être injecté, et celles du produit durci, soit dans notre cas, la mousse polyuréthane (Tableau 2.8). Cependant, il conclut en admettant que « bien sûr, un tel produit n'existe pas ».

Cependant les caractéristiques mécaniques de la mousse ne sont pas détaillées. KAROL [1990] et ANDERSSON [1998] indiquent seulement que la mousse doit posséder une « haute résistance » mais sans faire référence ni à la déformabilité, ni à l'adhérence de la mousse. Or ces paramètres sont très importants dans ce projet-ci parce que ce sont eux qui vont conditionner la durabilité de la mousse et sa résistance aux cycles d'ouverture et de fermeture des fissures.

2.4 Facteurs influençant le comportement de la résine avant et après gélification

Le mauvais choix dans le produit d'injection étant une des principales causes de l'échec d'un traitement par injection de polyuréthane, il est important de bien connaître les facteurs qui vont avoir une influence sur le traitement. Le tableau 2.8 fait ainsi l'inventaire de tous les paramètres qui vont influencer le comportement de résine au moment de l'injection, et le comportement à long terme de la mousse injectée dans la fissure. On a distingué dans cet inventaire, les facteurs qu'il est possible de contrôler et les facteurs que l'on ne peut contrôler.

Les paramètres reliés au coulis et à la réalisation de l'injection sont contrôlables. On peut distinguer ceux qui influencent le comportement de la résine pendant la phase d'injection et ceux qui influencent la mousse injectée.

Ainsi, la viscosité du coulis doit être assez basse pour que la pénétrabilité de la résine soit bonne, mais suffisamment élevée pour éviter que la perte de coulis ne soit trop importante. La vitesse de réaction doit, quant à elle, être ajustée en fonction de l'objectif à atteindre et du volume d'injection. Économiquement, le choix d'une résine très expansive est judicieux, mais la mousse obtenue sera moins dense.

TABEAU 2.9 FACTEURS INFLUENÇANT L'INJECTION DE LA RÉSINE ET LE COMPORTEMENT DE LA MOUSSE POLYURÉTHANNE

	Facteur influençant l'injection de la résine	Facteur influençant la mousse injectée
Facteurs contrôlables	<u>Paramètres reliés au produit d'injection</u> <ul style="list-style-type: none"> • viscosité • temps de réaction • expansion • facilité d'utilisation <u>Paramètres reliés à la réalisation de l'injection</u> <ul style="list-style-type: none"> • équipement utilisé • débit d'injection • pression d'injection • température du coulis 	<u>Paramètres reliés au produit d'injection</u> <ul style="list-style-type: none"> • stabilité volumétrique aux cycles gel-dégel et aux cycles mouillage-séchage • compatibilité avec le milieu injecté • déformabilité • adhérence au béton humide <u>Paramètres reliés à la réalisation de l'injection</u> <ul style="list-style-type: none"> • quantité de coulis injecté au mètre linéaire de fissure • quantité d'accélérateur
Facteurs non contrôlables	<u>Paramètres reliés au milieu injecté</u> <ul style="list-style-type: none"> • géométrie (superficie, ouverture, rugosité, tortuosité) • température du béton et extérieure • présence d'eau (pression, débit...) • présence d'un remplissage (limon, calcite, matières organique) 	<u>Paramètres reliés au milieu injecté</u> <ul style="list-style-type: none"> • état de saturation du béton (humide ou sec) et la pression d'eau. • type de fissure (active ou inactive) et importance du mouvement des fissures (nombre et amplitude)

Sur le chantier, dans des conditions de basses températures, il est aussi courant de chauffer les produits pour diminuer la viscosité et accélérer le temps de réaction. Aussi, la pression d'injection choisie contrôle la densité de la mousse finale obtenue.

Enfin, le débit d'injection, où la vitesse influence la répartition finale de la mousse injectée. Si le coulis est susceptible de se déplacer très loin dans un joint ou une fissure, on cherchera à avoir une vitesse d'injection assez grande. Par contre, si la zone d'injection n'est pas très étendue, on injectera à un débit faible pour laisser le temps à la résine de réagir.

Les paramètres reliés au milieu injecté ne sont pas contrôlables, mais il faut en tenir compte pour le choix du coulis et des paramètres d'injection. Ces facteurs sont reliés à la fois au milieu injecté et à l'environnement : ce sont les caractéristiques de la fissure, les conditions de saturation du béton et la température, le type de sollicitation sur la fissure injectée, c'est-à-dire l'importance des mouvements dus aux cycles de température et, éventuellement, la pression d'eau existante à l'amont.

2.5 Technique d'injection

2.5.1. Introduction

La méthode d'injection à la résine polyuréthane est, bien sûr, spécifique à chacun des sites étudiés [RUSSELL, 1993] et il est difficile d'avoir une procédure standard. S'il existe aussi certaines variantes, propres à des cas particuliers, une technique est généralement employée (Fig. 2.9). On y retrouve ainsi principalement trois phases :

- phase 1 : Préparation des forages d'injection
- phase 2 : Essai d'eau et colmatage (éventuellement)
- phase 3 : Injection du coulis



Figure 2.9 Technique d'injection utilisée pour injecter une fissure ou un joint au mur et au plafond d'un tunnel avec de la résine polyuréthane

2.5.2. Préparation des forages d'injection

Il s'agit tout d'abord de bien localiser l'étendue de la fissure ou du joint à injecter. Aussi, il est important de bien nettoyer, d'enlever les parties du béton éventuellement délaminé, voir d'assécher la surface de la fissure pour localiser précisément l'origine de la venue d'eau.

Les forages sont alors effectués de part et d'autre de la fissure, en quinconce, avec un espacement, un angle et une profondeur définis (Fig. 2.10).

- Le diamètre du forage est variable et dépend de l'obturateur (aussi appelé manchon, ou *packer*). Il est courant aujourd'hui d'utiliser des manchons de diamètre 3/8" (10 mm) ou 5/8" (16 mm). Les mèches utilisées doivent être en carbure de tungstène et au diamant, afin de ne pas risquer d'endommager les armatures existantes. Lorsque le forage coupe une armature, on doit le recommencer à proximité.

- L'espacement des forages dépend seulement de l'ouverture de la fissure à injecter, car c'est l'ouverture de la fissure qui conditionne la bonne propagation du coulis. Généralement, l'espacement des forages varie de 10 cm à 1 m (parfois plus). Dans les applications de ce projet, nous avons choisi un espacement de 15 cm pour des fissures micrométriques à 25 cm pour des joints.

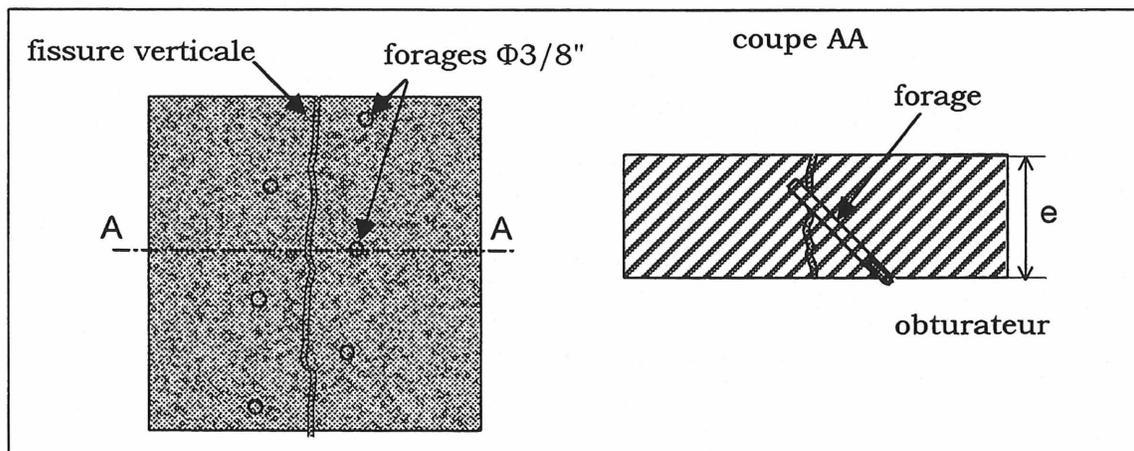


Figure 2.10 Patron d'injection généralement utilisé pour l'injection au polyuréthane

- La profondeur du forage est généralement choisie de façon à ce que le forage intercepte la fissure à la moitié de l'épaisseur du béton [RUSSELL, 1993], ou au moins au tiers. L'angle de forage, la longueur de la mèche et la distance du trou de forage à la fissure doivent donc être choisis de manière adéquate. Généralement, on choisit un angle de forage de 15 à 45°. Si l'épaisseur du béton est faible (moins de 15 cm), on préférera forer les trous d'injection directement dans la fissure. A la fin du forage, les trous doivent être nettoyés avec un jet d'air et un jet d'eau afin d'enlever les débris de forage et les poussières. Puis les manchons sont mis en place.

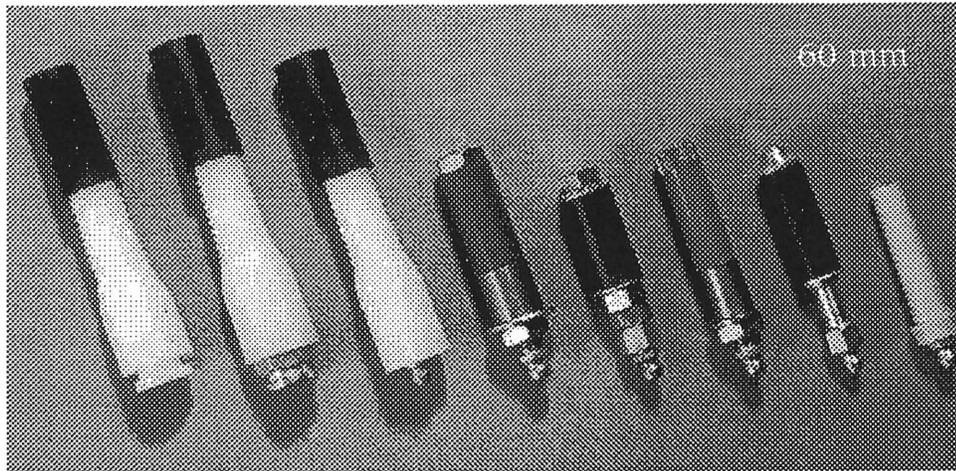


Photo 2.2 Manchons de différents diamètres (forages 10 mm (3/8in) ou 16 mm (5/8 in)) utilisés pour l'injection à la résine polyuréthane (Sce : www.avantigrout.com, site Web Avanti International)

2.5.3 Nettoyage des fissures et essai d'eau

Cette phase est très importante dans le succès de l'injection et elle remplit plusieurs fonctions :

- nettoyer et dégager les fissures de toute particule pouvant obturer la propagation de la résine et empêcher une bonne adhérence du coulis au béton ;
- identifier les réseaux de fissures qui communiquent les unes avec les autres et évaluer le cheminement futur du coulis ;
- vérifier que la communication s'établit bien avec les manchons adjacents et avec la fissure, ou le joint ;
- évaluer la quantité de coulis que la fissure absorbe ;
- évaluer le temps de retour de l'eau et ajuster le temps de réaction du coulis ;
- injecter l'eau nécessaire à la réaction de la résine (dans le cas où la fissure est sèche).

On peut également utiliser de l'eau colorée. Ceci permet d'avoir des informations sur le volume de la zone à injecter. Par exemple, si pendant l'essai d'eau, de l'eau colorée refoule immédiatement, le volume de la zone à injecter sera faible. Par contre, si l'eau qui ressort de la fissure est claire pendant un certain temps, le volume à injecter sera important. Cet essai permet aussi d'évaluer ainsi le temps de retour du coulis et d'ajuster en conséquence le pourcentage d'accélérateur. LA PENTA [1992] suggère d'ajouter l'accélérateur de façon à ce que le temps de

réaction du coulis soit égal aux trois-quarts du temps de retour de l'eau. Bien sûr, il est impossible d'ajuster le temps de réaction à chaque forage, mais, par contre, cela donne une bonne idée du temps de réaction à choisir pour l'injection d'un même joint ou d'une fissure.

S'il y a présence de dépôts de calcite, il est indispensable de nettoyer préalablement les fissures à l'acide phosphorique, puis de rincer à l'eau. En effet, dans le cas des fissures micrométriques présentant des traces de calcite, l'injection du coulis est problématique, car les dépôts calcaires vont empêcher la bonne propagation du coulis : le rideau d'injection risque d'être alors discontinu. Dans certains cas, on peut aussi utiliser un produit fluorescent (fluorescine), pour identifier les zones d'infiltration avec un projecteur à lumière ultraviolette.

Enfin, dans le cas où un forage n'intercepte pas la fissure, ou bien que deux manchons ne communiquent pas, il faut impérativement refaire des forages, soit parce qu'ils sont trop espacés, forés trop peu profond, ou avec un angle trop faible.

2.5.4. Colmatage

Dans le cas où une perte importante de coulis à la surface du joint, de la fissure ou d'un nid d'abeille est à prévoir, il faut mettre un produit de colmatage. Pour colmater une fissure ou un joint de construction, il est nécessaire de réaliser un trait de scie en surface afin de permettre l'accrochage du colmatage. Si on le dispose directement sur la surface du béton, il risque de céder à la surface du joint ou de la fissure sous la pression d'injection, ce qui est dangereux pour le personnel. Pour colmater un joint de dilatation contenant du polystyrène, on peut en enlever une partie sur une faible profondeur, puis mettre le produit de colmatage. Le produit utilisé peut être à base de mortier cimentaire hydraulique, d'époxy ou de polyuréthane.

2.5.5. Injection du coulis

a) Séquence d'injection

L'injection de la résine s'effectue à l'aide d'une pompe munie de régulateurs de pression et de débit, et de jauges de pression (Photo 2.3).



Photo 2.3 Pompe utilisée pour l'injection de la résine (Modèle Titan ÉPIC 440°)

On injecte le coulis successivement par tous les manchons mis en place autour de la fissure ou du joint. Comme dans l'injection classique, la séquence d'injection commence généralement du point le plus bas vers le point le plus haut. Cependant, si l'injection a pour objectif de canaliser une venue d'eau en la détournant vers un drain existant, il est préférable de débiter la procédure du point le plus haut vers le bas de la structure [RUSSELL, 1993] et [HALLS, 1997]. Il est préférable aussi de débiter l'injection par les points offrant le plus de résistance lors des essais d'eau (le point le plus bas ou l'extrémité d'une fissure). Il est plus facile de cette façon de contrôler le cheminement du coulis.

La séquence d'injection aussi peut être différente selon les cas étudiés. Généralement, on change de point d'injection dès que l'on a constaté que le coulis communique avec les manchons voisins et qu'il ressort à la surface. Tant que le coulis ne ressort pas à la surface, l'injection se poursuit à partir du même point d'injection, car c'est un signe que le coulis voyage bien.

Les embouts d'injection, qui possèdent une valve empêchant le retour du coulis, sont généralement mis en place juste après les manchons. Mais dans certains cas, comme lorsque la venue d'eau est assez forte (Photo 2.4), il est préférable de déconnecter les embouts pendant l'essai d'eau et pendant l'injection du coulis [BAKER, 1999]. Cela permet au coulis de bien

voyager de manchon en manchon, et aussi d'observer la progression du coulis dans le cas où la fissure est colmatée en surface.

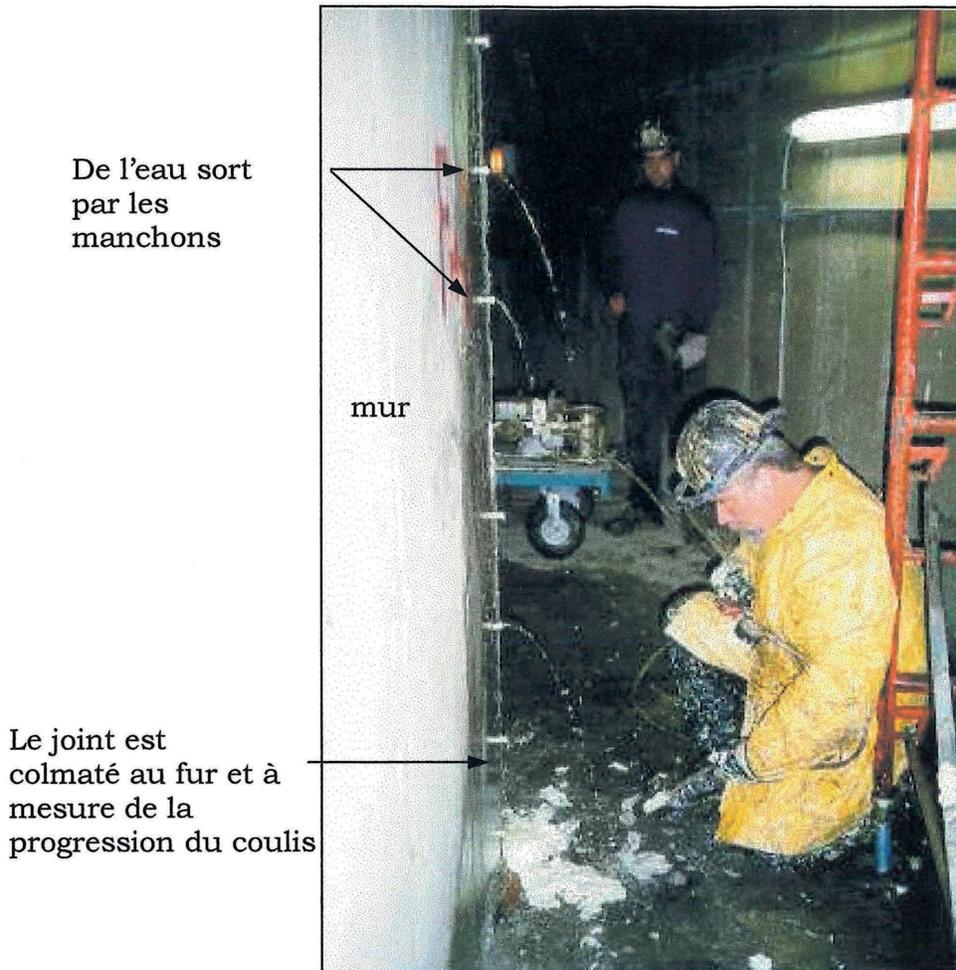


Photo 2.4 Injection d'un joint d'expansion au mur, avec venue d'eau

Contrairement à l'injection de coulis de ciment, l'injection de résine polyuréthane se fait en une seule série de forages rapprochés les uns des autres. Pour l'injection de fissures structurales, cette technique permet d'avoir un bon contrôle de l'injection, car on observe bien la communication entre les forages. Cependant, on essaye d'injecter en plusieurs phases, dans les mêmes forages, de manière à confiner au maximum la mousse polyuréthane. La première phase permet de colmater la fissure, la deuxième de combler éventuellement les vides restants et de confiner la mousse injectée dans la première phase. Quelquefois, certains produits vont durcir trop vite et il est impossible d'injecter à nouveau dans le même forage si le temps d'attente entre les deux phases

est trop long. Parfois, le changement des embouts d'injection permet de réutiliser les forages une deuxième fois.

Cependant, GLEN SMOAK [ABERDEEN GROUP, 1998] ne préconise pas la technique d'injection traditionnelle de manchon en manchon. Il recommande d'utiliser la même technique que celle utilisée pour les coulis de ciment, avec espacements fractionnés (*split spacing*). Des forages primaires sont forés et injectés, puis des forages secondaires, voire tertiaires et quaternaires. Ainsi, chaque séquence d'injection présente l'avantage de former des limites à la suivante, ce qui assure un bon confinement de la mousse. Par contre, cette technique complique la préparation des fissures et l'organisation des travaux, augmentant ainsi le coût de l'injection. Aussi, on ne peut pas contrôler si la résine communique bien avec le manchon voisin et savoir si le rideau d'injection est bien continu.

b) Contrôle de l'injection

Comme dans tous les travaux d'injection, c'est le contrôle de l'injection qui est primordial dans l'injection au polyuréthane. Le travail s'effectuant en aveugle, on ne sait pas toujours bien comment s'effectue la répartition du coulis dans la structure, ni à quel moment l'injection doit s'arrêter. Ainsi, il est intéressant de voir l'avis de plusieurs auteurs, qui ont appliqué des critères d'arrêt pour des cas d'application sur chantier.

LA PENTA [1992], pour le cas d'un tunnel du métro, à New York, suggère de continuer l'injection jusqu'à ce que tous les critères suivants soient satisfaits :

- le coulis pénètre dans la fissure à la pression limite choisie ;
- la perte de coulis est inférieure à 25 % de la quantité de coulis pompé ;
- la structure ne subit aucun dommage ;
- la quantité de coulis injecté au mètre linéaire est inférieure à la quantité limite choisie.

MARTIN et MC GOVERN [1996] ont travaillé sur l'injection au polyuréthane d'une conduite et insistent également sur l'importance du contrôle de l'injection.

Selon eux, il est important de continuer le processus d'injection tant que :

- **le coulis pénètre dans la fissure ou le joint ;**
- **la perte de coulis observable en surface est inférieure à 25 % du coulis pompé ;**
- **aucun dommage n'est constaté sur la structure ;**
- **le volume total de coulis n'excède pas une quantité limite choisie (4 litres/m) ;**
- **le coulis n'a pas voyagé à plus d'une distance choisie (1,5 m) de la fissure ou du joint à partir du point d'injection ;**
- **la venue d'eau se poursuit ;**

Étant donné le coût relativement élevé de la résine polyuréthane, le critère d'arrêt de l'injection le plus important est surtout basé sur une quantité maximum de coulis à injecter au mètre linéaire. A l'inverse, pour d'autres coulis, c'est la pression de refus (coulis de ciment) ou le taux de remplissage (émulsion de bitume) qui sont les principaux critères d'arrêt.

Enfin, la pression d'injection au polyuréthane est généralement plus forte dans les structures en béton (7 à 14 MPa) que dans l'injection de sol ou de rocher où il est courant de limiter la pression à 25 kPa /m (1 psi/pied) de matériau de couverture. Comme le fait remarquer LA PENTA [1992], dans une structure, on peut en effet permettre une certaine ouverture de la fissure sous la pression d'injection. De plus, comme le montre les essais d'injection sur dalle effectués à Hydro-Québec, [BALLIVY et coll., 1992] la pression d'injection se dissipe assez rapidement lorsque le coulis s'éloigne du forage.

2.5.6 Résultat final des travaux d'injection

Généralement, dans un projet de traitement de venues d'eau, l'objectif « raisonnable » des travaux d'injection au polyuréthane n'est pas de colmater absolument toutes les infiltrations, car pour avoir un traitement efficace à 100%, il faut mettre en œuvre des moyens très coûteux. LA PENTA [1992] affirme ainsi que l'injection au polyuréthane vise à réduire les infiltrations d'eau « dans des limites acceptables » et définit le succès d'une campagne d'injection à la résine polyuréthane comme « le passage d'un niveau inacceptable de venues d'eau à un niveau acceptable ». C'est d'ailleurs fréquemment des raisons économiques et non techniques qui vont

influer sur le pourcentage de réduction. Cependant, lorsque la sécurité de la circulation routière est en jeu, il est parfois indispensable de compléter le traitement à 100%, même si, comme l'affirme KAROL [1990], pour une structure fortement sujette aux infiltrations d'eau, il en coûte plus cher de stopper les derniers 10 % que de traiter les premiers 90% du pourcentage total des venues d'eau.

2.6 Synthèse

Dans le cas des tunnels revêtus en béton, il est donc particulièrement intéressant de choisir la technique d'injection, seule méthode de traitement d'étanchéité capable de ralentir la dégradation du béton due à l'eau d'infiltration. Aussi, le choix d'une résine polyuréthane flexible s'impose parce que dans le contexte des variations importantes de la température rencontrées au Québec, la réparation doit être souple.

Pour assurer la réussite du traitement, des coulis performants doivent être développés par les fabricants, des critères d'acceptation doivent être établis pour les sélectionner et l'application en chantier doit être soignée et bien contrôlée.

Aussi, les critères de sélection énoncés par plusieurs auteurs concernent seulement la viscosité et la réactivité des résines d'injection. Ces critères sont surtout utiles pour sélectionner des résines ayant une réaction adéquate, donc les résines les plus performantes pour assurer la réussite de la phase d'injection.

Mais l'approche expérimentale de ce projet, qui vise à sélectionner des coulis durables et stables, doit être différente car les critères importants doivent principalement tenir compte des caractéristiques mécaniques de la mousse, ce dont la littérature ne fait pas référence. Le chapitre 3 présente donc le programme expérimental de cette recherche, dont les objectifs sont à la fois de caractériser les coulis d'injection et de simuler le fonctionnement d'une fissure injectée de polyuréthane, soumise à des mouvements saisonniers.

CHAPITRE 3 : PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

Ce chapitre présente la méthodologie employée pour décrire les matériaux utilisés dans les essais de laboratoire. Ensuite, nous décrivons la démarche suivie dans la conception et la réalisation d'un montage expérimental et le choix des paramètres d'essais. Les objectifs de ces essais étaient en premier lieu, de mieux comprendre le comportement d'une fissure injectée de polyuréthane, d'avoir quelques ordres de grandeur sur sa résistance à la traction, mais surtout de savoir si l'étanchéité peut être durable ou de comprendre pourquoi certains traitements ont échoué dans des projets d'étanchéisation de tunnel.

3.1 Approche expérimentale

Les fiches techniques des produits fournies par les fabricants nous renseignent principalement sur le domaine d'application des résines, sur les caractéristiques de réaction de la résine (expansion, temps de réaction) et sur la viscosité de la résine (Fig. 3.1).

Cependant, en ce qui concerne la mousse injectée, si l'élongation et la résistance en traction de la mousse sont mentionnées, aucune information n'est disponible sur son adhérence au béton. Il est pourtant très important de tenir compte de l'interface béton-mousse. En effet, si l'adhérence de la mousse au béton est inférieure à la résistance en traction sollicitée lors de la déformation maximale, l'élongation et la résistance en traction de la mousse indiquées sur les fiches ne sont pas celles à considérer pour évaluer la durabilité de la mousse.

AMBEX

PRIME-FLEX 930 (MDI)

DESCRIPTION DU PRODUIT :

Le **Prime-Flex 930** est une résine d'injection sans solvant, aque-réactive à base de pré-polymères (MDI). Une fois mélangé au catalyseur Prime-Kat, ce polyuréthane liquide réagit à l'eau pour former une mousse semi-rigide à forte densité (cellules fermées) et colmater les infiltrations d'eau. L'expansion du produit est de 2200 % lors de la réaction. Cette mousse résistante est impénétrable par l'eau et est conçue pour étanchéiser les fissures dans le béton, le roc et les structures de maçonnerie.

UTILISATIONS :

- Tunnels (Métro et Autoroute)
- Joints d'expansion
- Regards d'égout
- Murs de fondation
- Puits d'ascenseurs
- Joints froids
- Barrages de béton
- Réservoirs d'eau
- Structures souterraines
- Conduites électriques

AVANTAGES :

- Sans solvant
- Semi-Flexible
- Mousse très résistante
- Jusqu'à 2.200 % d'expansion
- Très basse viscosité
- Hydrophobe (cellules fermées)
- Bonne résistance aux produits chimiques

CONDITIONNEMENT :

Contenants de 19 litres ou de 205 litres.

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES (RÉSINE) (23° C.)

Apparence	: Liquide Brun.
Viscosité	: 195 CPS
Poids par gallon	: 4,30 kg / gallon
Contenant solide	: 100 %

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES (PRIME-KAT) (23° C.)

Apparence	: Clair.
Viscosité	: 15-20 CPS
Poids par gallon	: 3,97 kg / gallon
Contenant solide	: 100 %

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES (MOUSSE)

Élongation (ASTM D-1623)	: 10 %
Retrait (ASTM D-1042 / D-756)	: < 1 %
Résistance à la tension (ASTM D-3574)	: 39 P.S.I
Densité (ASTM D-3674)	: 125kg / m ³

TEMPS DE RÉACTION (23° C.)

<u>PRIME-KAT CLEAR</u> (PAR VOLUME)	<u>RÉACTION</u>	<u>GEL</u>
1 %	80 secondes	5,5 minutes
3,5 %	30 secondes	80 secondes
5 %	20 secondes	70 secondes
7,5 %	12 secondes	47 secondes
10 %	12 secondes	30 secondes

Ces résultats sont basés sur une mousse mûrie sous pression. Ces propriétés peuvent varier selon la condition du chantier.

Figure 3.1 Exemple de fiche technique du produit Prime-Flex 930, de Ambex

Le programme d'essais de laboratoire a donc été réalisé de façon à mieux vérifier dans un premier temps les propriétés de la résine, puis de mesurer les caractéristiques mécaniques de la mousse injectée.

Ces travaux expérimentaux se sont principalement déroulés en deux phases :

- **Première phase :**

Des essais ont été réalisés au laboratoire sur différents échantillons de résine fournis par plusieurs distributeurs. Ces essais avaient pour but de caractériser les propriétés de réaction de quelques types de résine avant et pendant l'injection et d'étudier plus particulièrement l'influence de l'eau et de l'accélérateur sur la réaction de la résine.

- **Deuxième phase :**

Des essais mécaniques ont été effectués sur de la mousse injectée dans des échantillons de béton fissurés. Ces essais ont permis de suivre l'évolution de la pression pendant l'injection d'une fissure, simuler les mouvements cycliques d'ouverture et de fermeture saisonniers des fissures injectées et de tester la résistance en traction de la mousse polyuréthane.

3.2. Sélection des produits utilisés

Pour les essais, nous avons sélectionné les résines parmi une grande diversité de produits fournis par les distributeurs. Pour cela, nous avons utilisé les fiches techniques et les conseils des fabricants. Tout d'abord, les produits devaient tous être sans danger pour l'environnement, non toxiques et sans solvant. Ensuite, le principal critère de sélection était que le produit d'injection final devait être capable de se déformer sous l'effet des cycles de déplacement. Ainsi quatre types différents de résine, provenant de quatre distributeurs répondent à ces critères (Tableau 3.1). Ces résines sont définies au paragraphe 2.3, soit :

- **des résines moussantes hydrophobes flexibles ;**
- **des résines moussantes hydrophobes semi-rigides ;**
- **des résines moussantes hydrophiles ;**
- **des résines bicomposantes.**

TABEAU 3.1 RÉSINES TESTÉES AU COURS DE CE PROJET

Type	Produit	Distributeur	Viscosité (cP)
Mousses monocomposantes Hydrophobes et Semi-rigides	H 100	Multiurethanes	100 (25°C)
	PF 930	Ambex	190 à 230 (23°C)
	Jthane	Krytex	125 ± 20 (23°C)
Mousses monocomposantes Hydrophobes et Flexibles	F 1000	Multiurethanes	600 (25°C)
	PF 940	Ambex	300 à 500 (23 °C)
	Jthane Flex	Krytex	600 ± 200 (23°C)
Mousses monocomposantes Hydrophiles et Flexibles	900LVSF	Ambex	450 à 550 (23°C)
	Polygrout II	Mulco	780 (20°C)
	Polygrout III	Mulco	250 à 450 (20°C)
Résines bicomposantes Hydrophobes et flexibles	Polycast LV	Multiurethanes	130 (25°C)
	Hydrogel 970	Ambex	130 (23°C)
Résines bicomposantes Hydrophiles et flexibles	Polycast EXP	Multiurethanes	950 (25°C)

La réaction de toutes ces résines a été testée selon les recommandations des fabricants et avec différents pourcentages d'eau et d'accélérateur. Cependant, pour les deux phases du programme expérimental, soit l'essai de compatibilité et l'essai sur les échantillons de béton, il a fallu limiter le nombre de produits pour ne pas avoir un trop grand nombre d'essais.

Nous avons choisi de tester plus particulièrement les résines monocomposantes. En effet les résines bicomposantes présentent plusieurs inconvénients :

- elles ne sont pas expansives : une plus grande quantité de résine est nécessaire pour injecter une fissure. Choisir une résine bicomposante n'est donc pas la solution la plus économique ;
- leur temps de réaction est relativement long et leur viscosité est généralement très basse. L'injection est donc plus difficile ; il faut obligatoirement colmater la fissure en surface ;
- techniquement, l'injection des résines bicomposantes nécessite plus d'équipement que l'injection d'une résine monocomposante.

De plus, il s'est avéré que plusieurs produits distribués sous des noms différents possèdent en fait pratiquement les mêmes caractéristiques, même si leur composition chimique est tenue secrète

par les fabricants. Enfin, les résultats de SEBBAGH [1995] montrant le mauvais comportement des résines hydrophiles soumis à des cycles de gel-dégel ou mouillage-séchage, notre choix s'est porté sur trois résines hydrophobes, et une résine hydrophile :

- la résine hydrophobe flexible F 1000 de Multiurethanes ;
- la résine hydrophobe semi-rigide H 100 de Multiurethanes ;
- la résine hydrophobe semi-rigide PF 930 de Ambex ;
- la résine hydrophile flexible 900 LVSF de Ambex.

D'après les fiches techniques (cf. Annexe A), ces quatre résines possèdent toutes les propriétés suivantes :

- non toxiques, sans solvant ;
- aquaréactives ;
- déformables ;
- expansives ;
- viscosité comprise entre 100 et 600 cP;
- temps de réaction inférieur à 10 minutes ;
- sans retrait après la réaction (<2%) ;
- résistantes aux agents chimiques.

3.3 Essai de compatibilité de la résine avec l'eau et l'accélérateur (Première phase)

3.3.1 Méthodologie

L'eau et l'accélérateur ont respectivement pour rôle d'amorcer et de catalyser la réaction. Mais les fiches techniques ne mentionnent pas si la quantité d'eau a une influence sur la réaction et sur le produit final obtenus ni si la quantité d'accélérateur a un effet sur la structure de la mousse.

Ces essais ont donc permis tout d'abord de vérifier que la gamme de pourcentages d'accélérateur proposée par les fabricants permet bien d'obtenir des produits satisfaisants et possédant

effectivement les caractéristiques décrites dans les fiches techniques. Ils ont ensuite permis de voir les différents effets de la quantité d'eau et de la quantité d'accélérateur. Enfin, ces essais ont permis d'optimiser les quantités d'accélérateur et d'eau à rajouter pour obtenir le meilleur produit final et d'avoir un produit ayant des caractéristiques bien connues pour les essais mécaniques de la deuxième phase.

La méthodologie employée pour ces essais repose à la fois sur des observations qualitatives et sur la mesure de certains paramètres. Pour chaque produit plusieurs observations et de mesures sont réalisées selon les trois étapes suivantes :

1. Avant la réaction :

On note le **comportement général du mélange** de la résine avec l'accélérateur et l'eau, c'est-à-dire son homogénéité, sa fluidité, sa consistance et la facilité de mélange ;

2. Pendant la réaction :

On note la **réactivité des résines**, soit l'expansion des mousses, la vitesse de réaction (temps de réaction initial et final). Le temps de réaction initial (TI) correspond au début de l'expansion, au moment où le mélange devient opaque et le temps de réaction final (TF) correspond à la fin de l'expansion et au durcissement de la mousse ;

3. Après la réaction :

On note les **caractéristiques du produit final obtenu**, soit son apparence générale, son homogénéité, sa couleur, sa flexibilité, sa consistance, l'uniformité et la taille de ses bulles, et d'autres remarques telles que la présence de vides, de craquelures ou éventuellement d'un retrait après la réaction.

3.3.2. Choix des paramètres de l'essai

Étant donné qu'aucune procédure normalisée n'existe pour cet essai, plusieurs choix ont dû être faits sur la quantité de résine à utiliser, la gamme de pourcentages d'eau et d'accélérateur à rajouter ainsi que sur la température de l'essai.

a) Quantité de résine

Pour effectuer le même type d'essai sur toutes les résines, un même contenant en plastique, d'un volume de 500 ml, a été utilisé. Or, l'expansion de la mousse est très variable, d'un facteur de 5 à 30 selon le produit testé. Après consultation des fiches techniques, il a donc fallu distinguer plusieurs types de résine suivant leur expansion et choisir d'introduire différents volumes de résine au départ, afin de s'assurer que la mousse reste dans le contenant.

Pour cela, nous avons dû distinguer ainsi deux types de résine hydrophobe. De plus, pour les échantillons hydrophiles, même si l'expansion attendue est plus faible, il a fallu tenir compte du fait que le volume d'eau à rajouter au départ est plus important. Les volumes de résines à utiliser ont donc été de :

- 50 ml pour les échantillons hydrophobes dont l'expansion ne dépasse pas un facteur 10 ;
- 20 ml pour les échantillons hydrophobes dont l'expansion dépasse un facteur 10 ;
- 20 ml pour les échantillons hydrophiles.

Le choix de deux volumes différents a ainsi permis d'avoir une meilleure précision pour les mesures des vitesses de réaction et du taux d'expansion. Il a également été vérifié que cela n'entraîne pas d'erreur significative sur les mesures ; à cette échelle, deux échantillons de 20 ou 50 ml auront les mêmes expansions et vitesse de réaction.

b) Quantité d'eau et d'accélérateur

Pour les résines hydrophobes, tous les fabricants recommandent d'utiliser de 1 à 10% d'accélérateur pour amorcer la réaction. Deux types d'essais ont donc été réalisés :

- Pour voir l'influence de la quantité d'accélérateur, la première série d'essais a été effectuée à un pourcentage d'eau fixé à 5% et un pourcentage d'accélérateur variable de 1 à 20 %.
- Pour voir l'influence de la quantité d'eau, l'autre série a été effectuée avec un pourcentage d'accélérateur fixé à 5% et un pourcentage d'eau variable de 1 à 100 %.

Pour la résine hydrophile, les paramètres sont différents, puisque, tel que recommandé par le fabricant, il n'y a pas besoin d'accélérateur pour catalyser la réaction, mais la réaction a besoin d'une plus grande quantité d'eau. Dans ce cas, la série d'essais avait pour but de voir seulement l'influence de la quantité d'eau pour un pourcentage variant de 5% à 200 %.

c) Température

Sur chantier, lorsque l'injection a lieu en période hivernale, il est recommandé de chauffer les produits de façon à obtenir une température supérieure à 15°C. D'une part, cela permet d'avoir une réaction plus rapide et d'autre part, d'avoir une viscosité suffisamment basse pour améliorer la pénétrabilité du coulis.

C'est pourquoi, pour l'essai de compatibilité, les produits (résine, accélérateur et eau) ont été entreposés à une température de 20°C. Les essais ont été réalisés dans une pièce climatisée, à la même température de 20°C ± 1°C.

3.3.3. Procédure de l'essai

Ces essais ont été réalisés en mélangeant différents pourcentages d'eau et d'accélérateur à la résine dans un contenant de 500 ml (Fig. 3.2). Le mélange des réactifs a eu lieu dans l'ordre suivant :

- 1) mise en place de la résine (20 ml ou 50 ml selon les cas) ;
- 2) ajout de l'accélérateur et mélange (pour les résines hydrophobes) ;
- 3) ajout de l'eau et mélange.

a) Essais sur échantillons hydrophobes

Dans un premier temps, pour voir l'effet de l'accélérateur, le pourcentage d'eau permettant d'activer la réaction est fixé à 5% et plusieurs essais sont réalisés avec différents pourcentages d'accélérateur (1, 2, 3, 4, 5, 7, 10 et 20 %). Dans un second temps, pour voir l'effet de la quantité

Dans un premier temps, pour voir l'effet de l'accélérateur, le pourcentage d'eau permettant d'activer la réaction est fixé à 5% et plusieurs essais sont réalisés avec différents pourcentages d'accélérateur (1, 2, 3, 4, 5, 7, 10 et 20 %). Dans un second temps, pour voir l'effet de la quantité

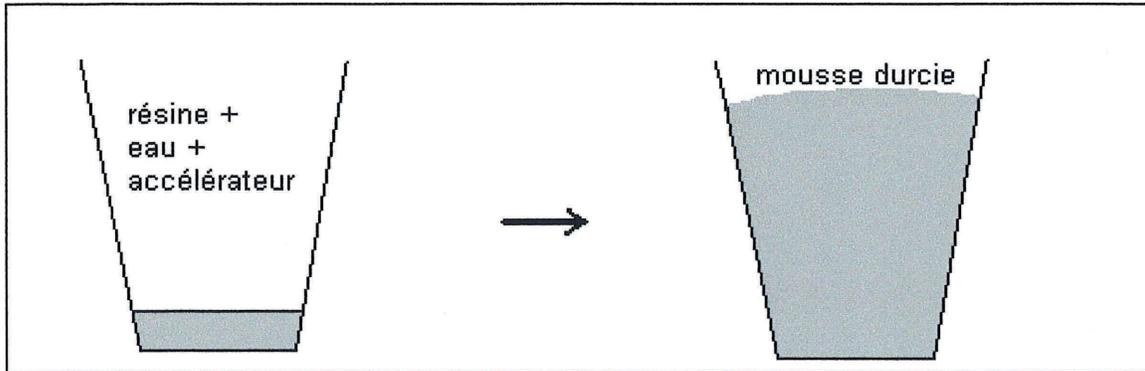


Figure 3.2 Essai de compatibilité de la résine avec l'eau et l'accélérateur

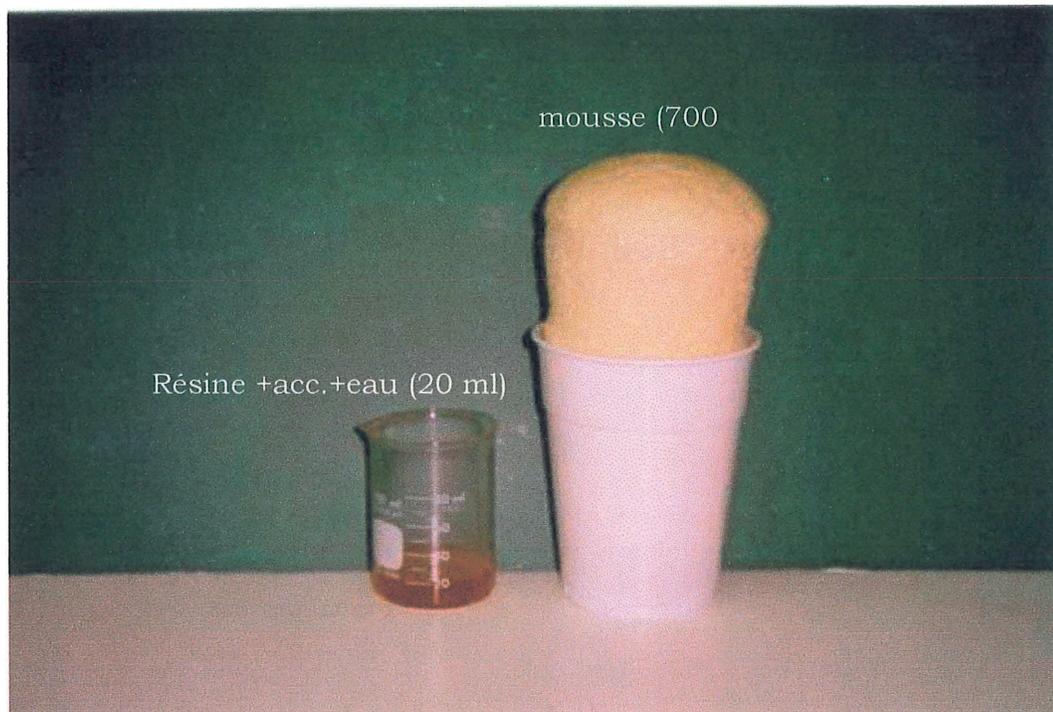


Photo 3.1 Exemple d'essai de compatibilité sur la résine PF 930 (expansion libre : 35)

d'eau, le pourcentage d'accélérateur est fixé à 5 %, et plusieurs essais sont réalisés à différents pourcentages d'eau : 2, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 50 et 100%.

Les produits sont mélangés manuellement à l'aide d'un agitateur. La durée du mélange est constante, soit 10 secondes pour l'accélérateur et 10 secondes pour l'eau. De plus, tous les essais sont effectués par le même manipulateur, afin de conserver une vitesse de mélange la plus constante possible d'un essai à l'autre.

L'expansion est calculée à partir du volume occupé par la mousse dans le contenant et les temps de réaction sont mesurés à l'aide d'un chronomètre. Pour le calcul des temps de réaction initial et final (TI et TF), le temps t_0 ($t_0 = 0$) correspond au moment où l'eau entre en contact avec la résine. Dans le cas des résines hydrophobes, il est possible de calculer TI, correspondant au début de l'expansion de la mousse, et TF, correspondant à la fin de l'expansion car la réaction commence rapidement. Par contre, pour les résines hydrophiles, il n'a pas été possible de mesurer TI, parce que l'expansion commence trop lentement pour distinguer précisément le début de la réaction, Dans le cas des hydrophiles, on a donc mesuré seulement TF.

Enfin, concernant les précautions à prendre, les essais doivent être réalisés sous une hotte ventilée et l'opérateur doit porter des gants, une blouse et des lunettes de sécurité pour prévenir tout contact du produit avec la peau et les yeux.

3.4 Essai de traction et essai cyclique sur fissure injectée (Deuxième phase)

3.4.1 Méthodologie

Les recherches effectuées au début de ce projet ont montré qu'aucun essai normalisé n'a été développé pour tester la mousse polyuréthane injectée. De plus, les équipements standards s'adaptent mal au comportement de la mousse qui prend beaucoup d'expansion. Il a donc fallu concevoir un banc d'essai permettant de reproduire le mieux possible les conditions réelles retrouvées en chantier.

Deux types de sollicitations peuvent entraîner la rupture de l'étanchéité d'une fissure injectée de polyuréthane : soit la pression de l'eau est trop forte en amont, soit la mousse ne résiste pas à

l'ouverture des fissures qui se produit au moment de la période de gel. Nous avons admis que si l'injection est réalisée de façon bien continue et que la profondeur de pénétration du coulis est suffisante, la mousse, imperméable, résiste bien à la pression de l'eau en amont. Par contre, il a été choisi de simuler la rupture de l'étanchéité lorsque l'ouverture de la fissure se produit. Le montage suivant a été développé pour faire plusieurs observations et mesurer différents paramètres :

1. Pendant la réaction :

On mesure l'évolution de la pression engendrée par l'expansion de la mousse pendant l'injection et le temps de réaction de la mousse.

2. Après la réaction

On mesure la résistance et la déformation en traction de la mousse injectée et la résistance de la mousse à différents cycles de déplacement, en simulant différents cas d'injection de fissure à différentes périodes de l'année (hiver ou été). De plus, on note le type de rupture se produisant au niveau de la fissure.

3. Après la rupture des échantillons

On vérifie que la mousse injectée est bien homogène et que l'injection s'est réalisée de façon bien continue.

3.4.2 Choix des paramètres d'essai

a) Sollicitations

Nous avons choisi d'effectuer l'essai en déplacement contrôlé, c'est-à-dire d'imposer un déplacement en traction avec une certaine vitesse et de mesurer la charge résultante sur l'échantillon. La vitesse de déplacement est également choisie de façon à imposer la sollicitation le plus lentement possible, soit 0,1 mm /minute.

De plus, pour connaître la durabilité de la mousse polyuréthane soumise aux variations de température saisonnières, un essai cyclique a été mis en œuvre. Comme pour l'essai de traction,

plusieurs paramètres tels que le nombre, la fréquence et l'amplitude des déplacements ont été choisis arbitrairement :

- L'amplitude des déplacements a été choisie de façon à simuler les sollicitations imposées à la mousse lors de cycles de température extrême (cf. calculs du paragraphe 2.2). Nous avons fixé dans un premier temps l'amplitude à 2 mm pour les fissures d'ouverture 5 mm et dans un second temps 1 mm pour les fissures d'ouverture 2 mm, soit des déformations ($\epsilon = \Delta l / l$) respectives de 40 et 50 %.
- Les premiers essais ayant montré que le comportement de la mousse se stabilise après 20 ou 25 cycles. Finalement, le choix de réaliser 30 cycles de déplacement sur l'échantillon a été retenu.
- Enfin, les déplacements cycliques imposés sur la mousse in-situ étant très lents, la fréquence des cycles a été choisie la plus faible possible. Pour des questions pratiques, la durée de l'essai a cependant été limitée : les 30 cycles ont été effectués en 45 minutes, soit une période d'environ 88 secondes par cycle.

b) Température et conditions de saturation

Comme pour l'essai de compatibilité, il a été considéré qu'il est possible de contrôler la température du coulis sur le chantier, quelle que soit la saison durant laquelle on injecte. Nous avons donc choisi de réaliser les essais en conditionnant la résine à la température de 20 °C.

Par contre, la température du béton n'est pas contrôlable dans la pratique. De façon à voir si la température a une influence sur l'injection de la résine et sur les caractéristiques de la mousse injectée, deux conditions de température ont été choisies pour nos échantillons de béton, soit 20°C et 5°C. Enfin, deux conditions de saturation ont été choisies : quelques échantillons ont été testés en condition sèche et la majorité en condition humide.

3.4.3 Présentation du montage expérimental

a) Choix des échantillons

Un montage, qui avait déjà été utilisé pour tester des membranes bitumineuses en traction (PALARDY et coll., 1997), a été repris et adapté pour cet essai. Les échantillons ont une forme parallélépipédique et possèdent une largeur plus grande aux deux extrémités pour fixer l'appareillage de traction. Les échantillons ont une hauteur de 206 mm, une section de 127 mm × 127 mm, sauf aux deux extrémités où la section est de 127 mm × 177 mm (cf. figure 3.3).

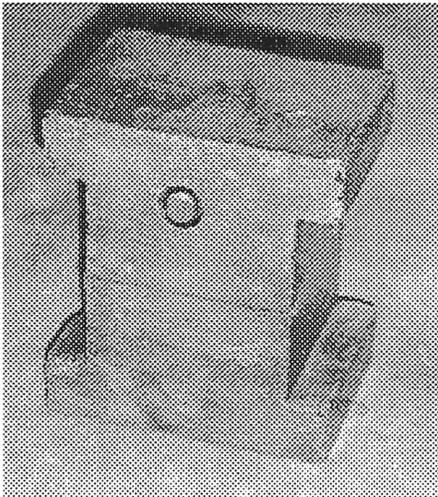


Photo 3.2 Échantillon de béton

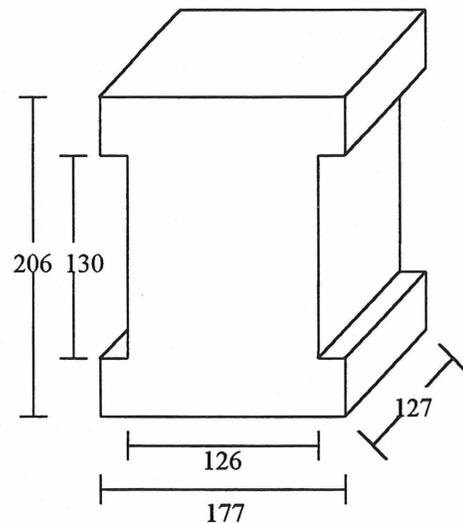


Figure 3.3 Dimension de l'échantillon (en mm)

Des essais préliminaires réalisés sur de petits cylindres de béton fissurés ont montré que lorsque l'échantillon est injecté, il est très fragile. Le montage a donc été conçu de façon à ne pas avoir à manipuler l'échantillon entre le moment de l'injection et l'essai de traction proprement dit. L'injection a donc été réalisée directement sur la presse, ce qui a obligé à forer le trou d'injection incliné à 45° (Fig. 3.4). Aussi, de manière à ce que la résine se répartisse uniformément dans la fissure, il était préférable de réaliser un tube d'injection interceptant la fissure perpendiculairement. C'est pourquoi l'injection a été réalisée à partir du côté de l'échantillon, par un tube incliné de 45°, celui-ci interceptant un tube vertical jusqu'à la fissure.

b) Préparation des échantillons

• Moulage des cubes de béton :

Les échantillons ont été fabriqués dans des moules de bois. La composition du béton a été choisie de façon à ce que le fendage de l'échantillon produise une seule fissure nette et régulière. C'est pourquoi la formulation du béton est celle d'un béton ayant une résistance en compression simple d'environ 60 MPa à 28 jours (Tableau 3.2). De plus, on a choisi d'utiliser des granulats petits et uniformes (diamètre inférieur à 10 mm). Douze échantillons ont ainsi été fabriqués. Les échantillons ont été démoulés après 24 heures et le mûrissement a été poursuivi en chambre humide pendant 7 jours.

TABLEAU 3.2 COMPOSITION DU BÉTON UTILISÉ POUR LES ÉCHANTILLONS

Éléments	Composition massique (%)
Ciment (Type 30)	18
Sable (Type Aimé Coté)	36
Granulats $\Phi \leq 10$ mm	38
Eau	8

• Rupture des échantillons par fendage :

Les échantillons ont été fracturés par fendage, à l'aide d'une presse hydraulique et de deux tiges d'acier permettant d'appliquer une charge continue sur l'échantillon (Photo 3.3).

La rupture de l'échantillon était soudaine: les surfaces de rupture obtenues sur les deux parties de l'échantillon contournaient les granulats et étaient dans l'ensemble très régulières, ce qui assurait une bonne uniformité des échantillons (Photo 3.4).



Photo 3.3 Fracturation d'un échantillon par fendage

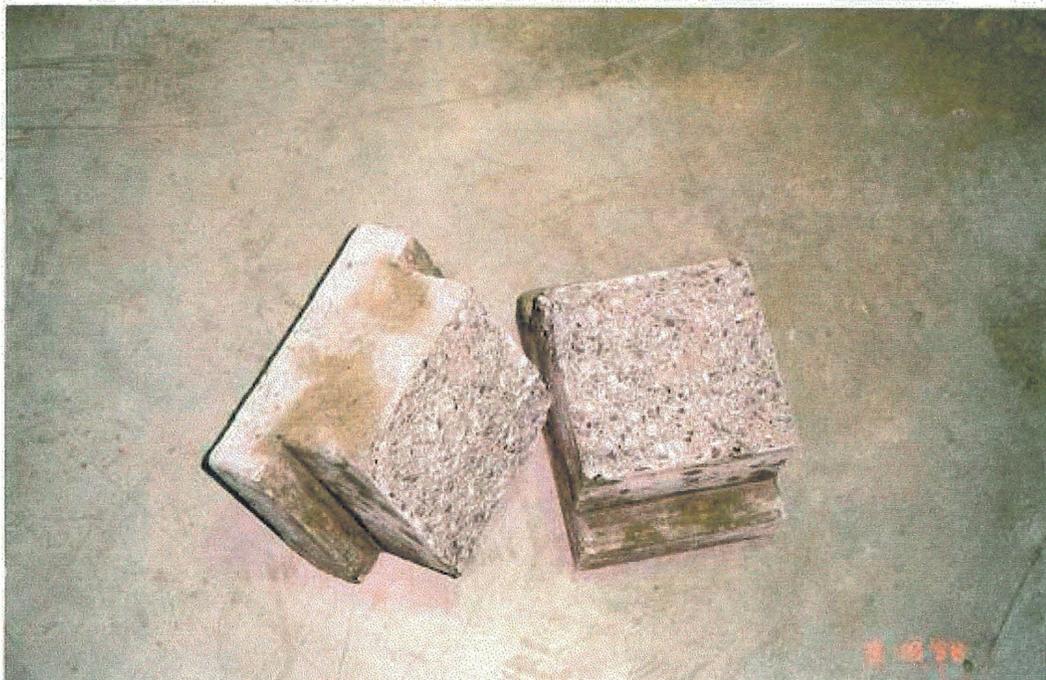
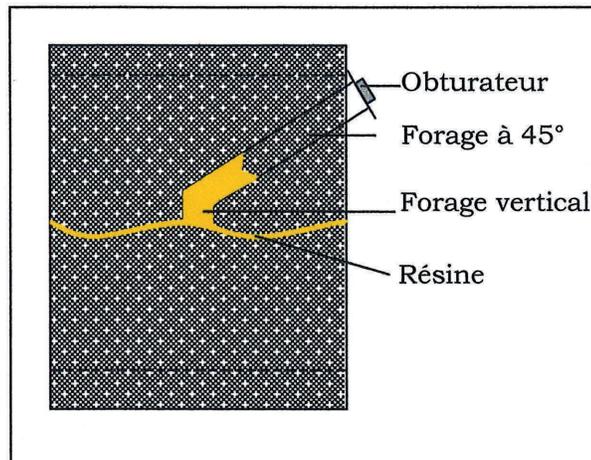


Photo 3.4 Échantillon de béton fracturé

- Forage des trous d'injection :

Pour chaque échantillon, un trou de 25 mm de diamètre a été à 45° (avant fracturation, par une des faces latérales), puis verticalement (après fracturation, par le côté fracturé). Pendant l'injection, la fermeture du trou était assurée par un obturateur mécanique (Fig. 3.4).

Figure 3.4 Forage du trou d'injection et répartition de la résine au cours de l'injection



- Conditionnement des échantillons :

Les échantillons ont été placés en condition sèche ou saturée, à température ambiante ou à 5 °C. Quelques essais ont eu lieu sur des échantillons secs et à 20°C, mais la plupart des essais ont eu lieu sur des échantillons humides, à 5°C.

c) Procédure d'injection

Le montage de l'échantillon sur la presse a lieu avant l'injection de façon à ne pas briser l'échantillon lors des manipulations. La cure sur place permet aussi de faciliter l'assise de l'échantillon sur la presse. De plus, il est possible ainsi de suivre l'évolution de la pression exercée par la mousse sur le béton pendant l'injection et la cure de la résine en enregistrant les données de la cellule de charge.

Tout d'abord, l'échantillon est fixé sur la presse à l'aide de quatre barres d'aluminium fixées au bâti principal au moyen de tiges filetées (Photo 3.5). Puis, l'ouverture de la fissure est réglée précisément à la valeur voulue (2 mm ou 5 mm) en enregistrant le déplacement du vérin (LVDT).

Le moule d'injection est alors placé autour de l'échantillon. C'est la principale difficulté dans l'injection de résines polyuréthannes au laboratoire parce que la pression développée par la réaction de la mousse est si élevée qu'il est difficile de contenir la mousse dans la fissure. Des essais effectués sur d'autres échantillons montrent que la perte de coulis est impossible à éviter à moins de réaliser un moule d'injection parfaitement étanche et très résistant. Mais dans ce cas, la fissure serait fermée, et il n'y aurait pas de sortie d'air : la bonne propagation du coulis serait alors gênée. En fait, dans le cas de l'injection in-situ, la perte de coulis est inévitable [LA PENTA, 1992]. Il n'est donc pas gênant d'avoir des pertes dans l'échantillon si elles restent dans des limites acceptables. Cependant, compte tenu du facteur d'échelle, ces pertes sont relativement plus importantes sur l'échantillon de laboratoire que sur chantier. Pour assurer le confinement de la mousse un moule constitué de quatre planches de bois et d'une membrane en caoutchouc a été utilisé. L'ensemble est maintenu à l'aide de deux serre-joints pendant l'injection (Photo 3.5).

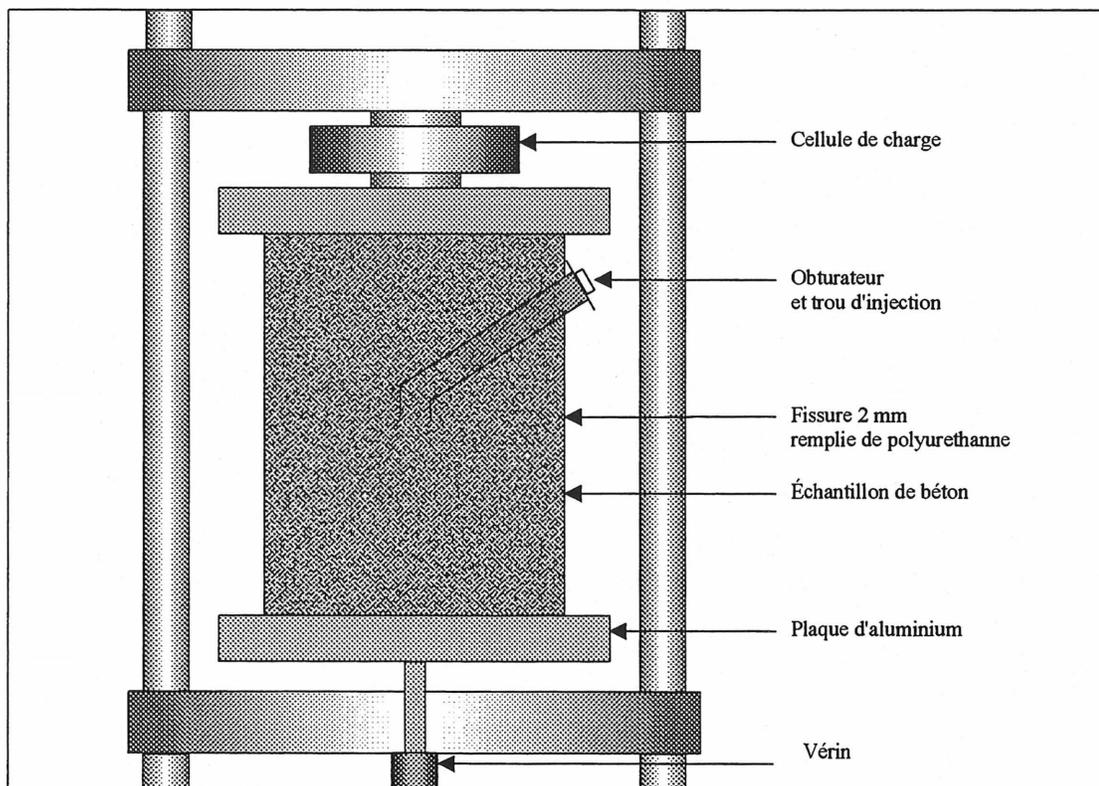


Figure 3.5 Montage expérimental

On procède alors à l'injection du coulis. La résine est mélangée avec l'accélérateur (pour les mousses hydrophobes seulement) dans un récipient selon la même procédure que celle utilisée pour l'essai de compatibilité. Le système d'acquisition permettant d'enregistrer la charge et le déplacement est activé. Le déplacement est également mesuré pour vérifier qu'il se maintient à zéro pendant l'injection et qu'il n'y a pas de vibration de la presse. Ensuite, pour activer la réaction, de l'eau est ajoutée au mélange résine+accélérateur. Le coulis est injecté par gravité, au moyen d'un tube de plastique et d'un entonnoir mis en place dans le forage d'injection de l'échantillon. Lorsque tout le coulis est injecté, un obturateur mécanique est mis en place et serré dans le tube pour éviter le reflux de la mousse (Fig. 3.5 et Photo 3.5).

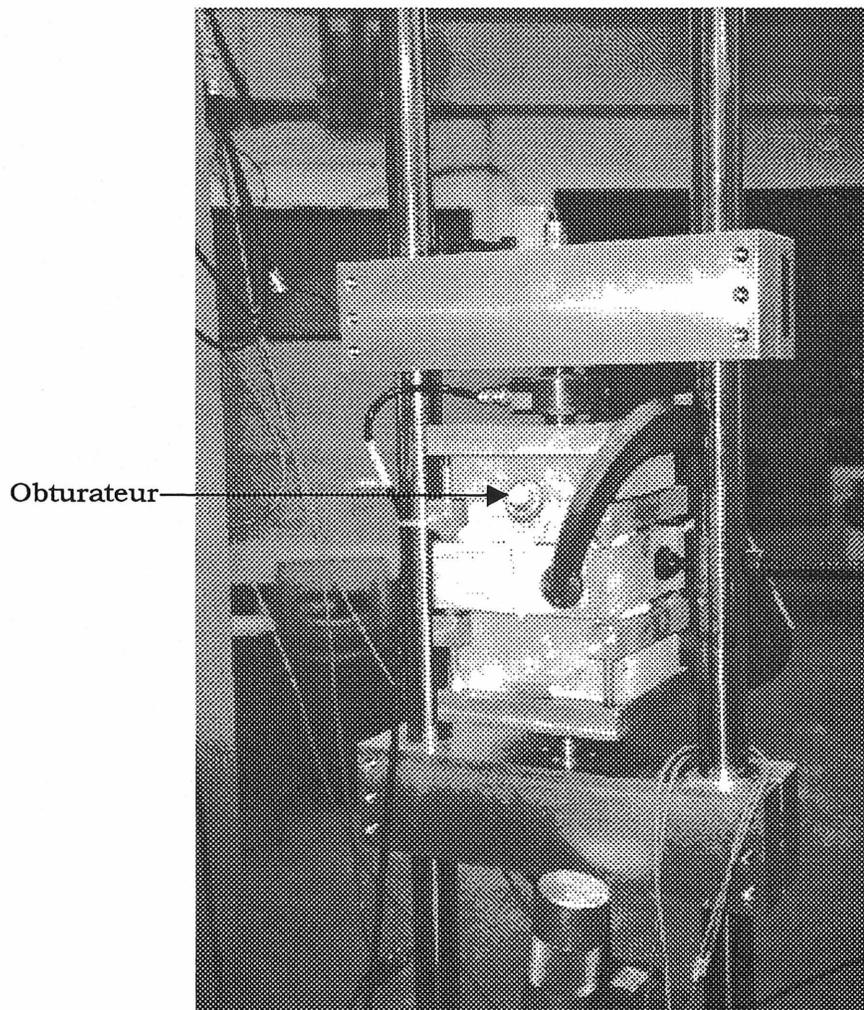


Photo 3.5 Injection d'un échantillon sur la presse

3.4.4 Caractéristiques de la presse et des instruments de lecture

Puisqu'une très faible résistance à la traction est attendue pour les mousses polyuréthanes injectées, une cellule de charge (MTS, Photo 3.6) de faible capacité (10 kN) a été utilisée, avec différents calibres de charge suivant la pression maximale attendue :

- 5 kN pour la pression développée pendant l'injection (maximum de 310 kPa en compression) ;
- 2 kN pour la résistance en traction (maximum de 124 kPa en traction) ;
- 10 kN pour l'essai cyclique (maximum de 620 kPa en compression) .

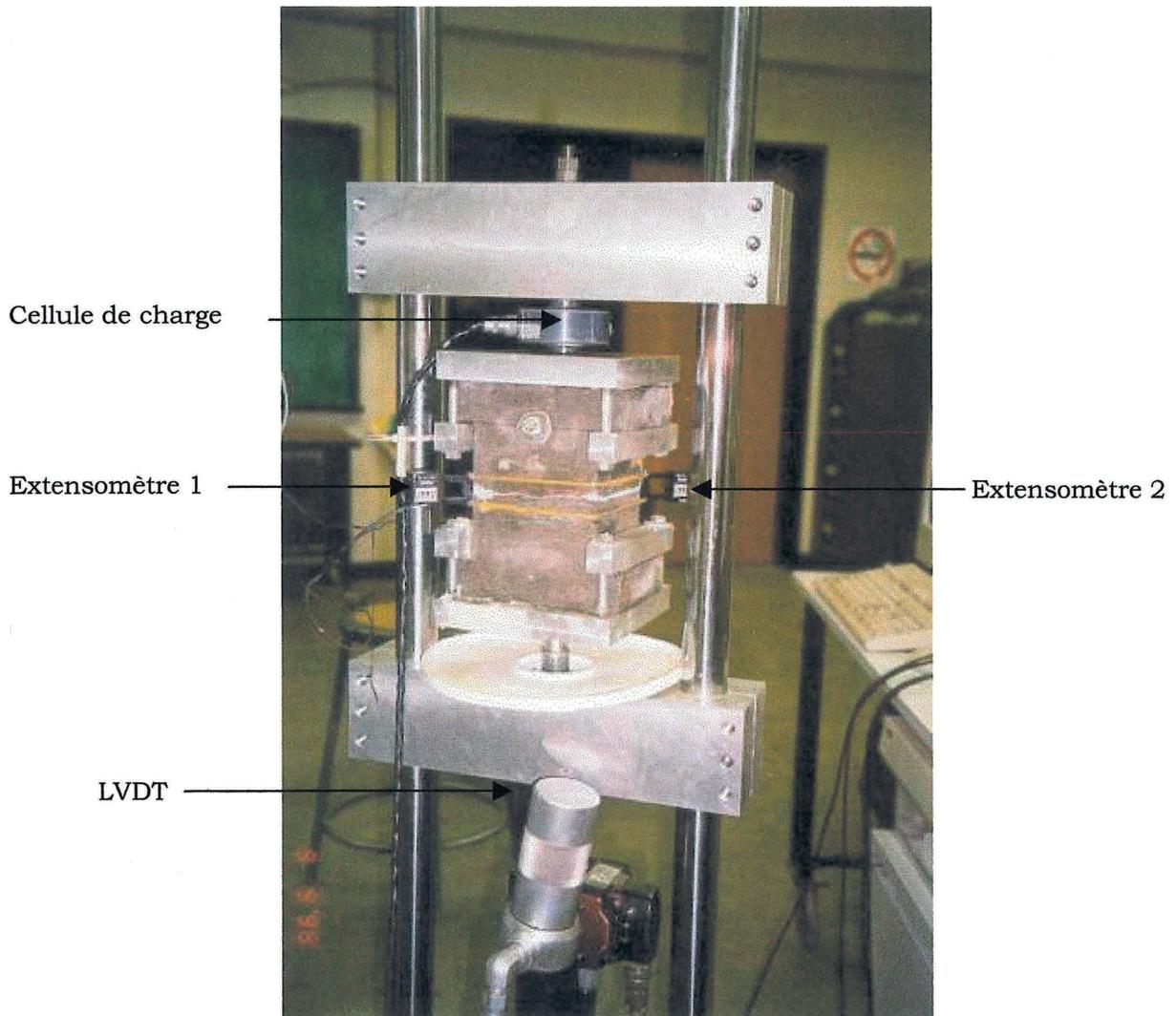


Photo 3.6 Échantillon injecté, prêt pour l'essai de traction

Le déplacement uniaxial est mesuré par trois moyens, soit deux extensomètres et un vérin. Les deux extensomètres sont du modèle MTS 632.11C-20 et possèdent une course de $\pm 2,5$ mm. Ils sont placés diamétralement opposés sur deux coins de l'échantillon, tandis que le déplacement du vérin est mesuré au centre. Les données sont lues et enregistrées par un système d'acquisition et traitées par un programme qui permet de visualiser la charge et le déplacement en fonction du temps sur un ordinateur.

3.4.5 Présentation des résultats de l'essai

Le montage permet de suivre plusieurs paramètres suivant les phases de l'essai, soit :

- la pression exercée par le coulis pendant l'injection et la cure ;
- la résistance et la déformation de rupture pour l'essai de traction ;
- l'évolution de la charge et du module de déformation pendant l'essai cyclique ;
- la résistance et la déformation de rupture pour l'essai de traction suivant l'essai cyclique.

Il faut en particulier expliquer comment le module de déformation est calculé pour l'échantillon qui, constitué de béton et de mousse, peut être défini comme « un matériau composite ». La déformation (ε) est définie comme le rapport du déplacement longitudinal de l'échantillon (Δl) par la longueur de l'échantillon susceptible de se déformer. Cependant, notre montage développe des charges très faibles pour considérer que la déformation du béton est nulle. La longueur de l'échantillon qui peut se déformer est donc l'ouverture (e_0) de la fissure (5 ou 2 mm selon les échantillons). La déformation vaut donc (équation 3.1) :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{e_0} \quad (3.1)$$

Pour les essais de traction, nous avons choisi de représenter les résultats en traçant les courbes $\sigma = f(\varepsilon)$. Pour les essais cycliques, les résultats ont été représentés en traçant les courbes $\sigma = f(\Delta l)$, afin que les graphiques fassent apparaître les variations d'ouverture de la fissure (2 mm ou 5 mm).

CHAPITRE 4 : ANALYSE DES ESSAIS DE LABORATOIRE

Ce chapitre présente les résultats obtenus dans les essais effectués sur plusieurs résines d'injection et sur des échantillons de mousse injectée. L'analyse s'appuie sur quelques graphiques présentés dans le texte et l'ensemble des résultats est détaillé en annexe. Le chapitre est ainsi divisé en quatre parties. Tout d'abord, sont présentés les résultats des essais de compatibilité, puis l'injection des échantillons de béton fracturés. Enfin, nous terminons par l'analyse des essais de traction et des essais cycliques.

4.1 Essais de compatibilité

Comme expliqué dans le chapitre 3, nous avons choisi de tester quatre résines d'injection :

- la résine hydrophobe flexible F 1000 ;
- les deux résines hydrophobes semi-rigide H 100 et PF 930 ;
- la résine hydrophile flexible 900 LVSF.

Tout d'abord, on analyse l'influence de l'accélérateur et de l'eau sur la réaction de la résine et sur la structure de la mousse obtenue, puis le retrait au séchage de la mousse polyuréthane. L'ensemble des résultats des essais de compatibilité est présenté en annexe B.

4.1.1 Influence de l'accélérateur

L'influence de l'accélérateur a été observée seulement sur les trois échantillons de résines hydrophobes, étant donné que la réaction de la résine hydrophile ne nécessite pas l'ajout d'un accélérateur. Les résultats montrent que la quantité d'accélérateur a plusieurs effets sur le temps de réaction, sur l'expansion de la résine et sur les caractéristiques finales de la mousse obtenue (Fig. 4.1, 4.2 et 4.3).

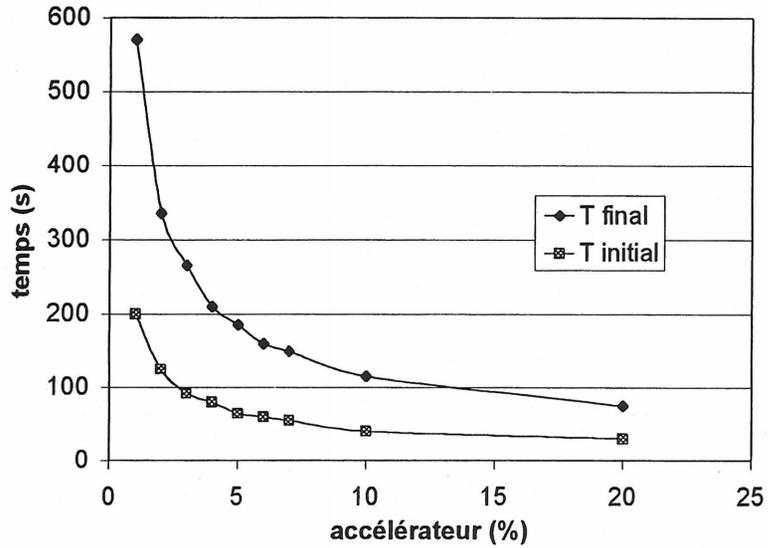


Figure 4.1 Temps de réaction de la résine F 1000 vs % Acc.

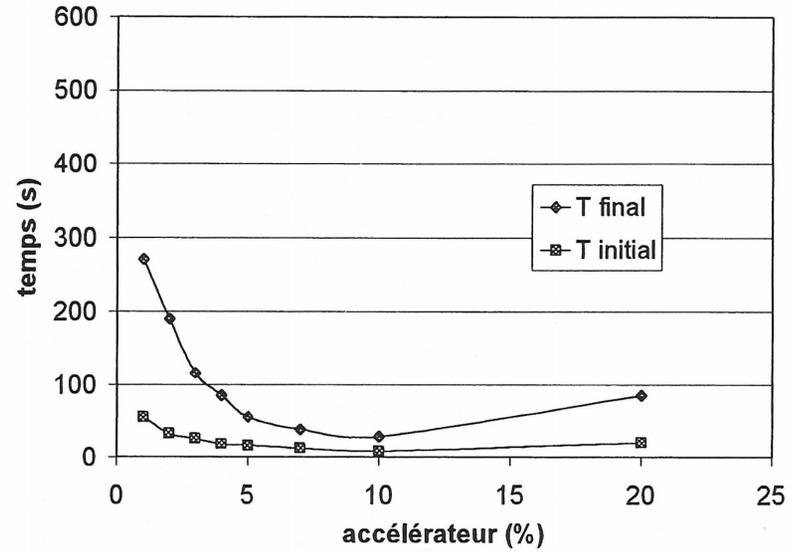


Figure 4.2 Temps de réaction de la résine PF 930 vs % Acc.

62

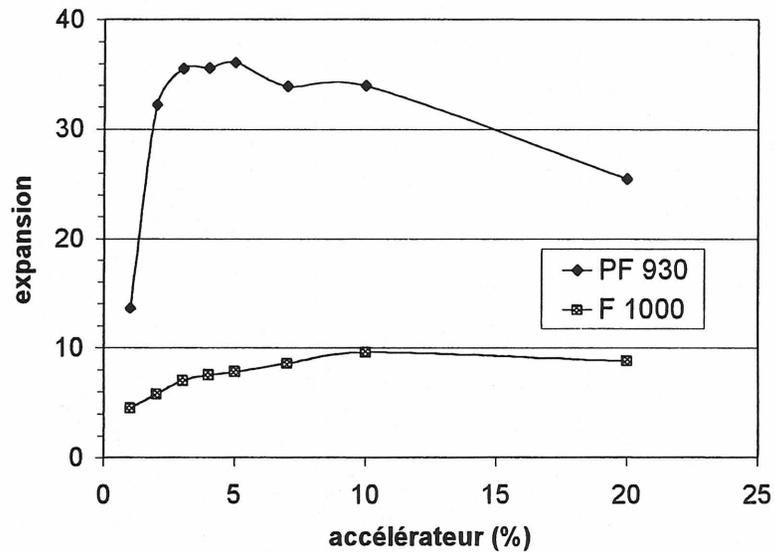


Figure 4.3 Expansion des résines F 1000 et PF 930 vs % Acc.

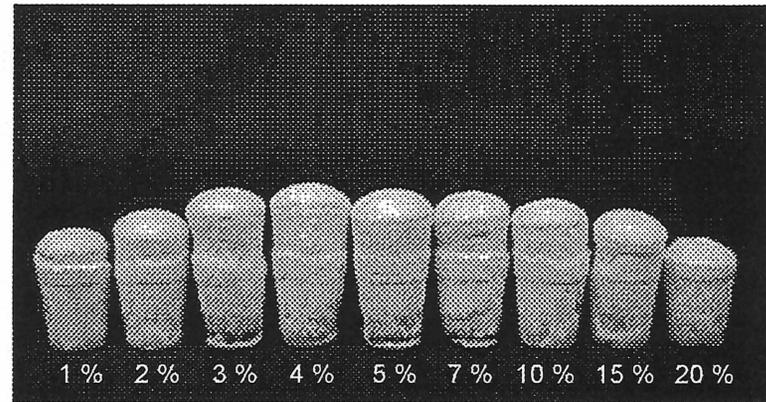


Photo 4.1 Influence de la quantité d'accélérateur sur l'expansion de la résine hydrophobe semi-rigide PF 930

L'accélérateur a ainsi plusieurs effets sur le temps de réaction des résines flexibles et semi-rigides (Fig. 4.1 et 4.2). On a pu ainsi observer que :

- les échantillons produits par la réaction sont tels que décrits dans les fiches techniques (cf. Annexe A) ;
- le pourcentage d'accélérateur recommandé par les fabricants (entre 1 et 10 %) est satisfaisant puisque, pour toutes les résines, le temps de réaction final de la mousse est inférieur à 10 minutes à 20°C ;
- le temps de réaction minimum est pratiquement atteint à 10 % d'accélérateur ;
- l'augmentation de la quantité d'accélérateur a non seulement pour effet de diminuer les temps de réaction et initial (TI) et final (TF) mais aussi la durée de la réaction (TF-TI) ;
- à 20°C, un pourcentage d'accélérateur situé entre 3 et 10 % permet d'obtenir un temps de réaction final inférieur à 5 minutes.

En ce qui à trait à l'expansion de la mousse (Fig. 4.3 et Photo 4.1), on observe que, pour obtenir un produit final ayant la meilleure expansion, il faut choisir idéalement un pourcentage d'accélérateur situé entre 3 et 10 %.

Enfin, concernant les caractéristiques du produit final obtenu, on constate que pour obtenir un produit final ayant les meilleurs caractéristiques, c'est-à-dire possédant une structure homogène avec des bulles fines et un réseau de bulles bien uniforme, il est préférable de choisir un pourcentage d'accélérateur le plus faible possible. En effet, lorsque le pourcentage d'accélérateur est trop élevé (10 % et au delà), la mousse est hétérogène et les bulles sont grossières. Dans le cas particulier des résines semi-rigides, la mousse est aussi plus friable et moins souple à mesure que la quantité d'accélérateur augmente. Enfin, dans le cas des résines flexibles, un retrait important de la mousse se produit au-delà de 10 % d'accélérateur.

En tenant compte des précédentes analyses, un pourcentage de 5 % a donc été choisi pour les essais suivants.

4.1.2 Influence de l'eau

L'influence de l'eau a pu être observée à la fois sur les échantillons hydrophiles et hydrophobes.

a) Résines hydrophobes

Pour les résines hydrophobes flexibles et semi-rigides (Fig. 4.4, 4.5 et 4.6), une très faible quantité d'eau est nécessaire, soit 1%, pour activer la réaction de polymérisation. A partir de 1 % et jusqu'à 10 % d'eau, la variation de quantité d'eau n'a pas d'effet sur la réaction. Par contre, au-delà de 10 à 20 % d'eau dans le mélange, celle-ci a un effet néfaste : il d'augmente le temps de réaction. La réaction étant exothermique, en effet, l'excès d'eau refroidit le mélange et ralentit sensiblement la réaction.

Le taux d'expansion de la mousse est optimal lorsqu'on rajoute 3% à 20 % d'eau dans le mélange (Fig. 4.7). Dans cette zone, la variation de la quantité d'eau n'a que très peu d'effet sur l'expansion de la mousse et sur ses caractéristiques. L'eau en excès ne participe pas à la réaction puisque la mousse n'absorbe pas d'eau.

Il n'est donc pas utile de rajouter beaucoup d'eau pour activer la réaction. Pour les essais suivants, un pourcentage d'eau de 5% a été choisi pour tous les produits hydrophobes.

b) Résine hydrophile

Pour la résine hydrophile, le comportement est bien différent des résines hydrophobes, puisque la résine nécessite une plus grande quantité d'eau pour réagir. De ce fait, on constate que l'expansion maximale (EXP=8, Photo 4.2), généralement plus faible que pour les résines hydrophobes, est obtenue lorsque l'on ajoute 20% d'eau (Fig. 4.8 et Photo 4.3), tandis que le temps de réaction final le plus faible est obtenu entre 50 et 100 % d'eau (Fig. 4.9).

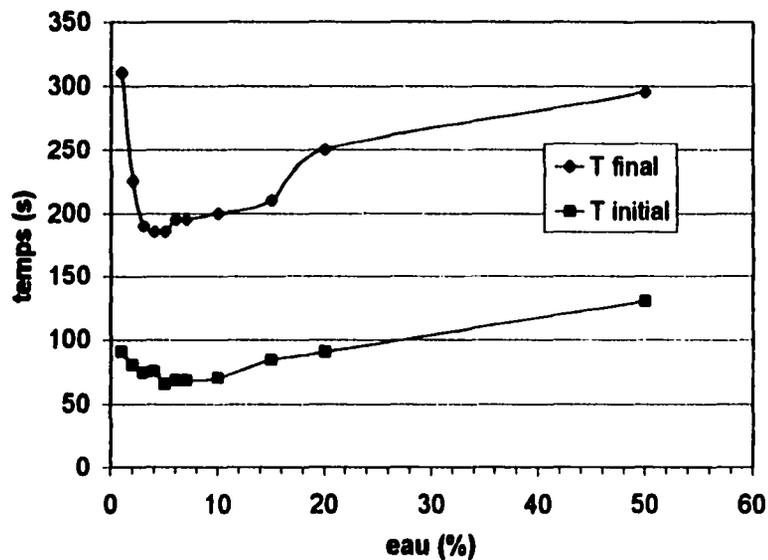


Figure 4.4 Temps de réaction de la résine F1000 vs % d'eau

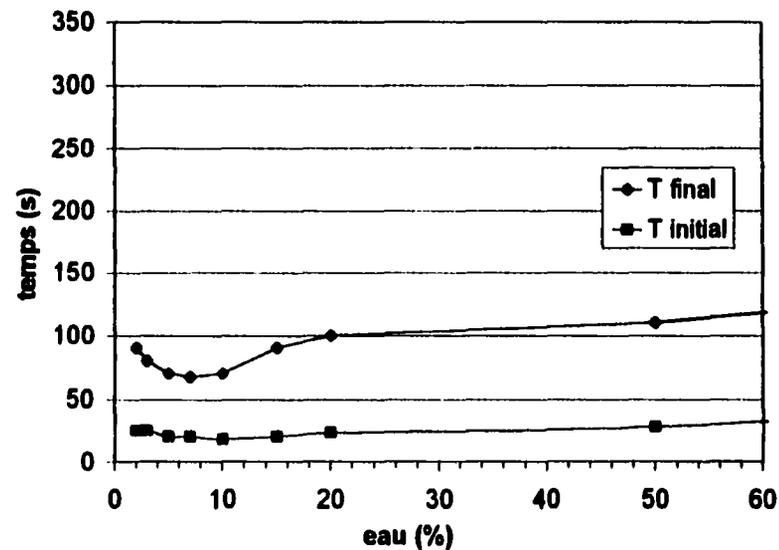


Figure 4.5 Temps de réaction de la résine PF 930 vs % eau

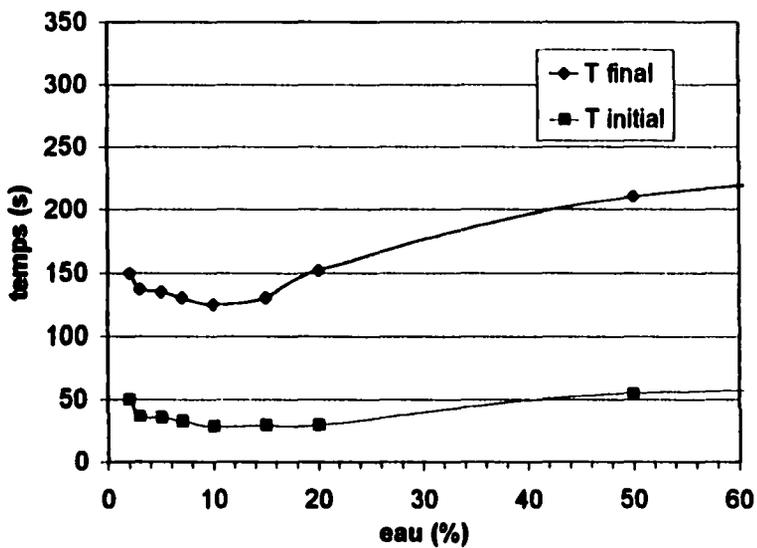


Figure 4.6 Temps de réaction de la résine H 100 vs % d'eau

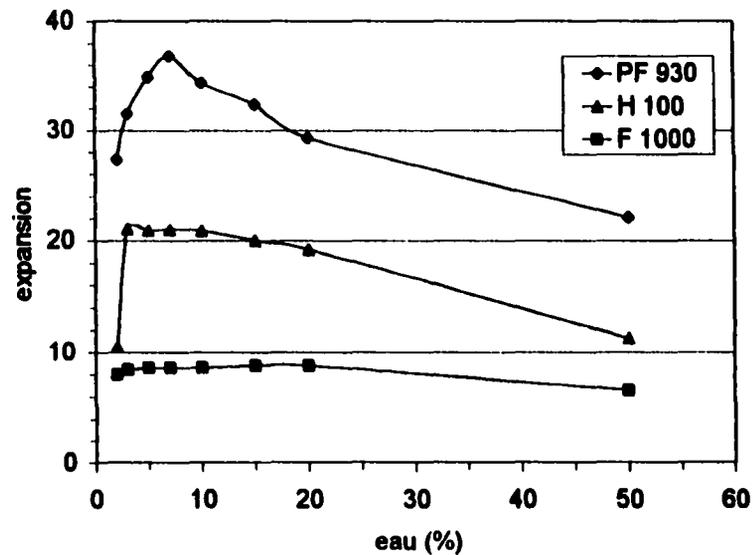


Figure 4.7 : Expansion des résines H100, F1000 et PF 930 vs % eau

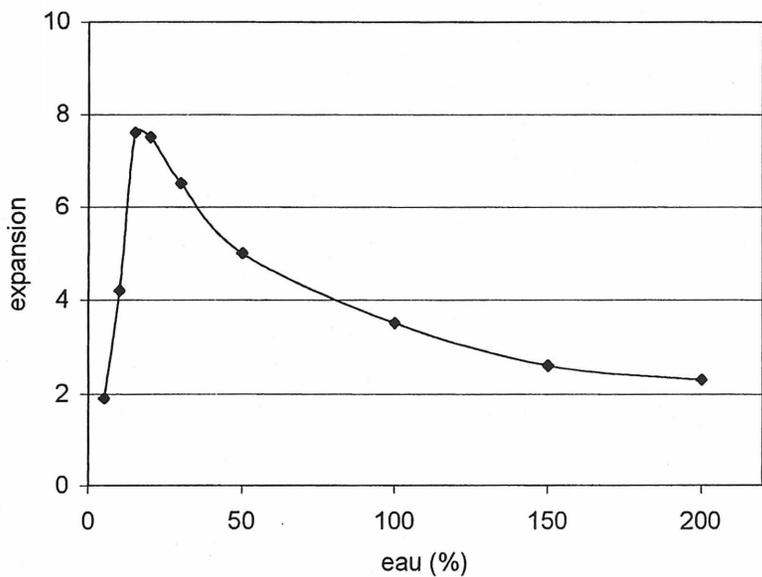


Figure 4.8 Expansion de la résine 900 LVSF vs % eau

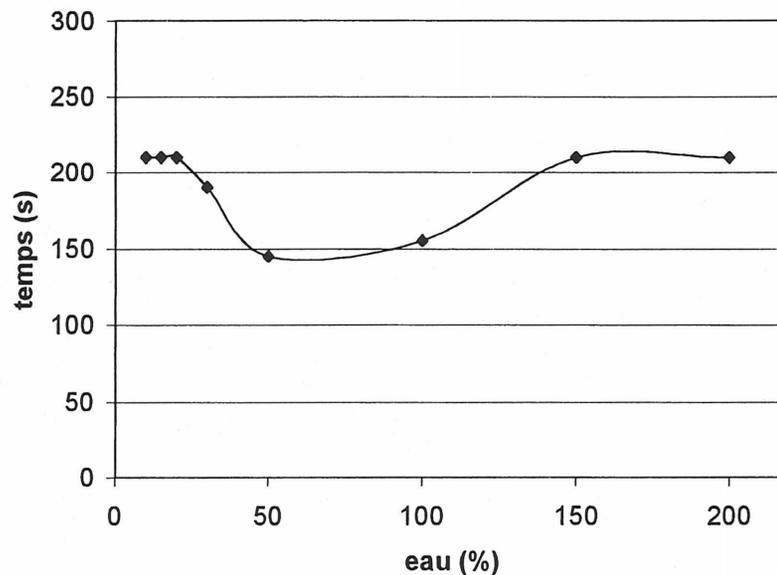


Figure 4.9 Temps de réaction final de la résine 900 LVSF vs % eau

99

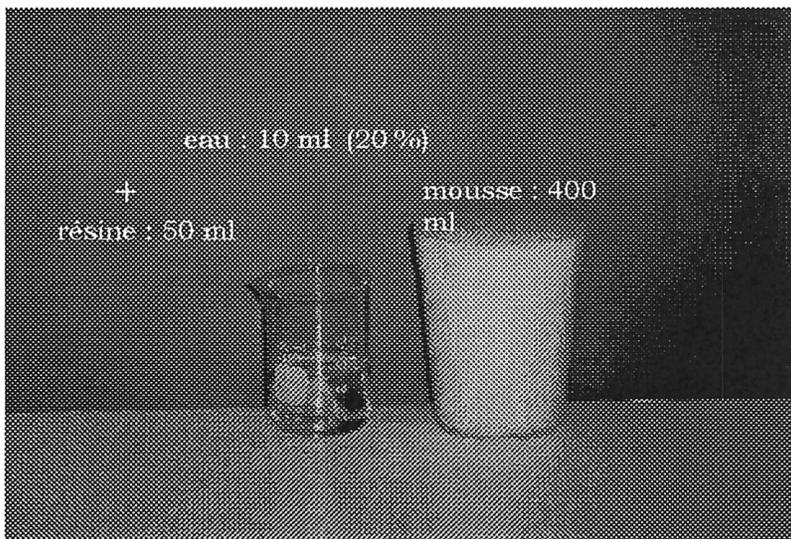


Photo 4.2 Expansion (EXP=8) de la mousse 900 LVSF

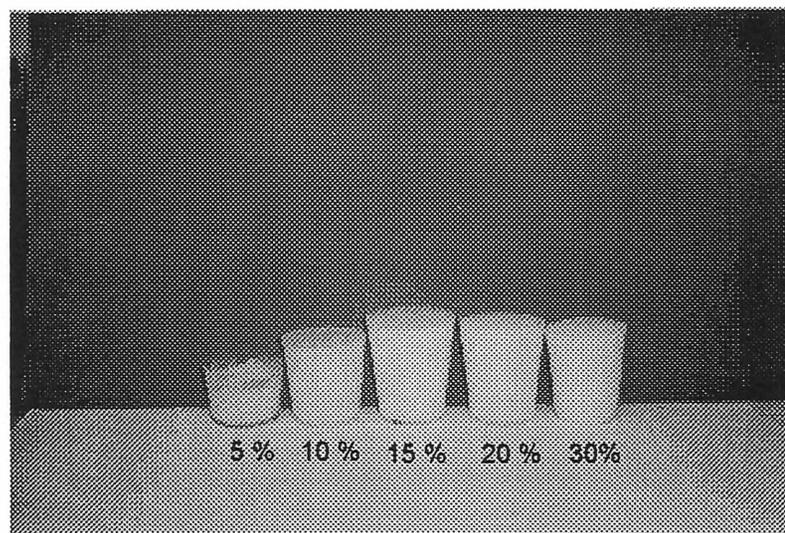


Photo 4.3 Échantillon 900 LVSF à 5, 10, 15, 20, 30 % d'eau

4.1.3 Retrait au séchage

Une fois tous les essais de compatibilité complétés, tous les échantillons ont été laissés à température ambiante et pesés à intervalle régulier, soit à 1, 7, 14, 21 et 28 jours. Nous avons pu aussi observer si la mousse était stable dans le temps, du point de vue du retrait au séchage.

Pour les résines hydrophobes F1000 et PF 930, on constate que pendant 28 jours, la masse de tous les échantillons diminue progressivement par évaporation de l'eau. Cette diminution de masse correspond quasiment à la quantité d'eau présente initialement dans chacun des mélanges (Fig. 4.10 et 4.11). Cela confirme qu'une très petite quantité d'eau est nécessaire pour la réaction, et que la quantité d'eau en excès reste à l'extérieur de la mousse et s'évapore facilement. Pendant cette période, les échantillons n'ont ainsi subi aucune variation volumétrique.

Pour les échantillons hydrophiles (Fig. 4.12), le même phénomène est observé, une diminution progressive de la masse apparaît, mais l'évaporation s'effectue de manière plus lente. La quantité d'eau présente dans les mélanges de départ étant élevée, seuls les échantillons contenant moins de 30 % d'eau ont perdu par évaporation tout leur contenu en eau, alors qu'il faut un peu plus de 28 jours pour ceux contenant plus de 30 % d'eau. De plus, pour les échantillons contenant 15% d'eau et plus, cette perte d'eau se traduit par un important retrait de la mousse visible à l'œil nu (Photo 4.4). Dans le cas de la mousse hydrophile, il reste également de l'eau en excès après la réaction, mais cette eau est contenue dans les bulles de la mousse cette fois. Lorsque cette eau s'évapore, les bulles flexibles se rétractent comme une éponge.

Cette méthode ne permet pas de mesurer le retrait volumique de la mousse hydrophile, mais a permis de montrer qualitativement que la résine hydrophile n'a pas une bonne stabilité volumétrique lorsqu'elle est soumise à une période de séchage.

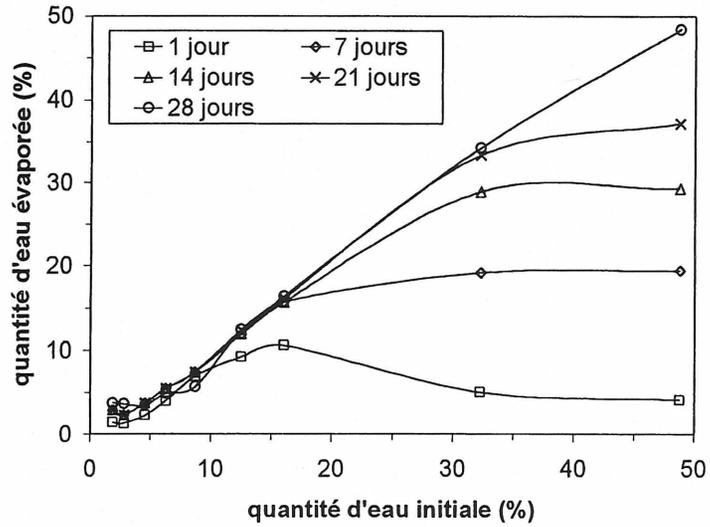


Figure 4.10 Perte d'eau au séchage - PF 930

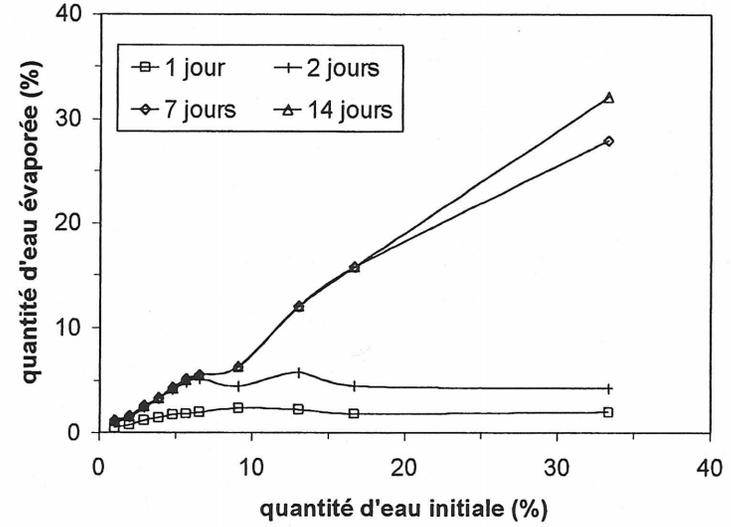


Figure 4.11 Perte d'eau au séchage - F 1000

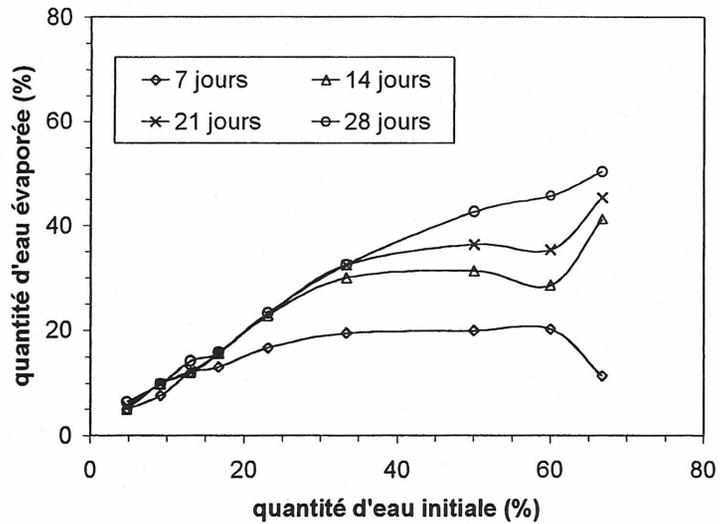


Figure 4.12 Perte d'eau au séchage - 900 LVSF

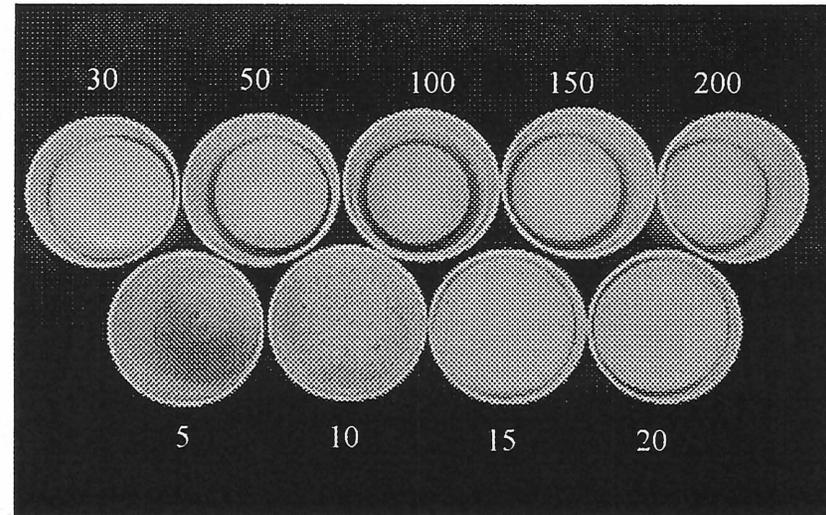


Photo 4.4 Retrait au séchage (28 j) de la mousse hydrophile 900 LVSF (rapport Eau/Résine en %)

4.1.4 Synthèse des essais de compatibilité

Ces essais ont montré principalement que le comportement des résines varie beaucoup entre une résine hydrophobe et une résine hydrophile.

La résine hydrophobe a besoin d'une très petite quantité d'eau pour réagir. Le surplus d'eau ne fait que ralentir la réaction, mais n'a pas d'effet sur la structure de la mousse obtenue. Aussi, la quantité d'accélérateur n'a pas besoin d'être trop importante pour obtenir une réaction rapide (TF<10min), et ne doit pas dépasser les recommandations données par le fabricant (10 %), sinon la structure de la mousse obtenue n'est pas satisfaisante (bulles grossières, mousse hétérogène, résine non réagie). L'expansion libre de la mousse hydrophobe est très élevée. Elle varie selon le type de résine : 8 pour la résine flexible et 20 à 35 pour la résine semi-rigide. Enfin, la mousse hydrophobe est stable dans le temps, et ne subit aucun retrait dû au séchage.

La résine hydrophile a besoin d'au moins 10 à 100% d'eau pour réagir, toute l'eau étant absorbée par la mousse. Son expansion est plus faible (maximum 8) et la réaction est relativement rapide. Cependant, lorsque la mousse contient au départ 15 % d'eau et plus, il se produit un important retrait de la mousse au séchage, lorsque l'eau contenue dans les bulles s'évapore. La mousse hydrophile n'est donc pas stable au retrait de séchage.

Pour les essais suivants, nous avons choisi les pourcentages d'eau (5%) et d'accélérateur (5%) pour chacune des résines hydrophobes. Pour la résine hydrophile, un rapport de 1:1 en volume a été choisi, soit 100 % d'eau, parce que c'est le rapport couramment utilisé en chantier. Le tableau 4.1 regroupe les quantités choisies et les caractéristiques de chaque mousse ainsi obtenue.

TABLEAU 4.1 COMPOSITION (EAU ET ACCÉLÉRATEUR) ET CARACTÉRISTIQUES DES RÉSINES UTILISÉES POUR LE MONTAGE EXPÉRIMENTAL

Résine	Type	Acc. %	Eau %	EXP (libre)	TI (20°C)	TF (20°C)
PF 930	Mousses monocomposantes hydrophobes et semi-rigides	5	5	35	20 sec	1 min 15
H 100		5	5	20	40 sec	2 min 15
F 1000	Mousse monocomposante hydrophobe flexible	5	5	8	1 min	3 min
900LVSF	Mousse monocomposante hydrophile flexible	0	100	4	45 sec	2 min 30

4.2 Injection des échantillons de béton fracturés

4.2.1 Introduction

L'objectif principal des essais réalisés sur les échantillons de béton fracturés et injectés avec de la résine polyuréthane est de connaître les propriétés mécaniques de la mousse (adhésion, résistance en traction, déformabilité) et son comportement après plusieurs cycles d'ouverture et de fermeture de fissure. Les premiers essais ont montré qu'il était également possible de suivre l'évolution de la pression pendant l'injection. Des informations intéressantes sur l'injection de la résine peuvent être ainsi tirées de ces essais. La discussion des résultats obtenus est illustrée dans les paragraphes suivants par quelques graphiques, tandis que l'ensemble des résultats de ces essais d'injection est présenté en annexe C. Les essais, 56 au total, ont été réalisés avec les quatre résines testées dans les essais de compatibilité soit :

- 19 sur la résine semi-rigide hydrophobe PF 930 (notés SRA1 à SRA19) ;
- 16 sur la résine semi-rigide hydrophobe H 100 (notés SRB1 à SRB16) ;
- 3 sur la résine flexible F 1000 (notés F1 à F3) ;
- 18 sur la résine hydrophile flexible 900 LVSF (notés Hi1 à Hi18).

4.2.2 Ajustements de la procédure

Le déroulement de l'injection a été ajusté après quelques essais de réglage. Le fait de travailler à petite échelle a notamment imposé quelques modifications à la procédure d'injection au laboratoire par rapport à l'injection sur le chantier.

a) Conditionnement des échantillons

Un premier essai a permis de faire le réglage de l'essai en condition humide. L'échantillon de béton était sec et 50 ml d'eau ont été injectés dans la fissure juste avant l'injection de la résine. On a constaté que la rupture en traction de l'échantillon se produisait par décollement de la mousse de la partie inférieure du béton (cf. Photos en annexe C). Il a donc fallu modifier la procédure, l'eau ayant en effet tendance à s'accumuler au bas de l'échantillon.

La procédure choisie pour les essais suivants a donc été de mettre l'échantillon dans l'eau au moins 48 heures avant l'essai, soit à température ambiante, 20°C, soit à 5°C. Puis l'échantillon était sorti de l'eau pendant l'injection et pendant la durée des essais de traction et cyclique. Au moment de l'injection, l'échantillon était à la température de conditionnement (5°C ou 20°C) et il restait suffisamment d'eau dans la fissure pour faire réagir la mousse. Pendant l'essai de traction ou l'essai cyclique, qui se déroulait environ une heure après l'injection, la température de l'échantillon se rapprochait de la température ambiante.

b) Confinement de l'échantillon

La mise en place et le serrage latéral du moule d'injection produisent des contraintes de compression sur la cellule de charge. Ceci est dû au fait que les faces horizontales de l'échantillon ne sont pas parfaitement parallèles. Il a été fait en sorte que ces contraintes soient constantes d'un essai à l'autre. Au départ de chacun des essais, la contrainte verticale passe ainsi de 0 à 20 kPa au moment où le moule est mis en place.

c) Injection de la résine

De façon à être certain que toute la résine réagit bien pendant l'injection, de l'eau est rajoutée au mélange résine+accélérateur, en plus de l'eau présente dans la fissure, soit 5 % pour les résines hydrophobes et 100 % pour les résines hydrophiles (Tableau 4.1).

La plus grande difficulté rencontrée dans la réalisation d'un échantillon injecté de polyuréthane était d'arriver à contenir au maximum la mousse dans la fissure. Pour le choix de la quantité de coulis à injecter, il a fallu tenir compte du fait que, comme pour l'injection in-situ, la perte de coulis était inévitable dans l'échantillon [LA PENTA, 1992]. Il a donc fallu déterminer la quantité de résine adéquate à injecter dans l'échantillon. Les premiers essais ont ainsi montré que, pour une fissure de 2 mm d'ouverture, environ 20 à 30 % de la mousse injectée par le tube d'injection se maintenait dans la fissure et que le reste sortait du moule d'injection. Après des essais de réglages, il a été choisi d'injecter 60 ml de résine pour les essais réalisés sur des fissures de 5 mm d'ouverture et 50 ml pour les fissures d'ouverture 2 mm.

d) Desserrage du moule d'injection

Le moule d'injection doit être enlevé pour mettre en place les instruments de lecture et pour réaliser l'essai de traction. Cette opération s'effectue lorsque l'on considère que la mousse a terminé sa réaction, soit au moment où la pression d'injection se stabilise après avoir atteint son maximum.

Cette opération produit une baisse soudaine de la charge, baisse que l'on retrouve sur tous les essais et qui est due à deux facteurs : d'une part, la contrainte verticale initiale (20 kPa), due au serrage du moule, est annulée ; d'autre part, le confinement latéral de la mousse est supprimé. L'effet est surtout visible pour des fissures d'ouverture 5 mm, parce que pour les fissures d'ouverture 2 mm, le confinement latéral est faible.

4.2.3 Évolution de la pression d'injection

a) Injection de la résine hydrophobe semi-rigide PF 930

Au total, 19 échantillons ont été injectés avec la résine PF 930. Les premiers essais ont été réalisés avec une ouverture de fissure de 8 mm (1 essai), puis 5 mm (7 essais), afin de voir si la répartition de la résine était satisfaisante dans l'échantillon. Effectivement, ces essais ont montré que la fissure était bien remplie de mousse. Les essais suivants ont donc eu lieu avec une ouverture de fissure de 2 mm (11 essais). Les conditions du béton ont aussi été ajustées : les premiers essais ont eu lieu sur des échantillons à température ambiante (20°C), en condition sèche ou humide et les suivants sur des échantillons placés à 5°C en condition humide, de façon à considérer le cas de l'injection d'une fissure fine en période hivernale.

Tous les échantillons, à 20°C comme à 5°C, ont été parfaitement bien injectés : la mousse obtenue est dense, homogène et continue (cf. Photo en annexe C, après la rupture en traction). Mais il est difficile d'obtenir des essais similaires, parce que la quantité de résine effectivement injectée dans la fissure varie beaucoup suivant les essais. On constate que c'est la quantité de résine injectée qui influence directement la pression maximum générée lors de l'injection (Fig. 4.13).

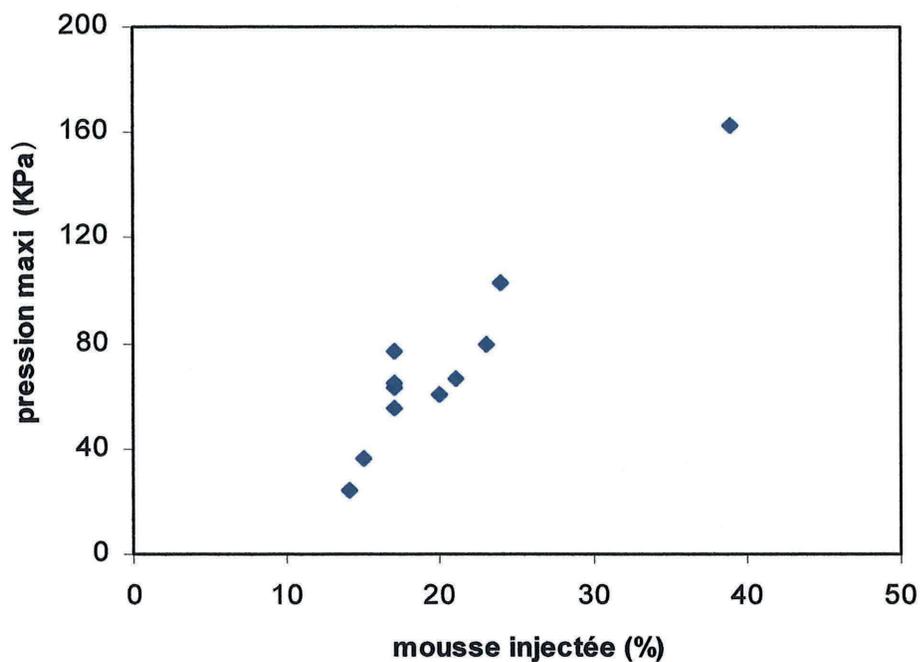


Figure 4.13 Pression maximum générée lors de l'injection du PF 930 en fonction de la quantité de mousse effectivement injectée. (11 essais, fissure de 2 mm, à 5°C)

Calculé sur 16 essais, le pourcentage moyen de résine effectivement injectée est de 20 % (écart type de 6%). Il est alors possible de calculer le taux d'expansion moyen obtenu en condition confinée en prenant pour exemple une fissure de 2 mm d'ouverture (Fig. 4.14).

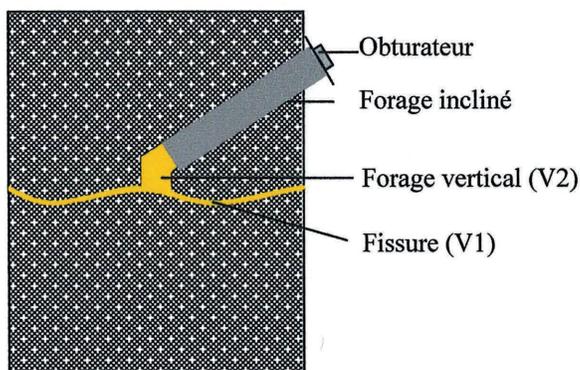


Figure 4.14 Calcul du volume final occupé ($V_f = V_1 + V_2$) par la mousse

Le volume approximatif V_1 de la fissure vaut (équation 4.1) :

$$V_1 = e \times S \quad (S, \text{ section et } e, \text{ ouverture de la fissure}) \quad (4.1)$$

$$V_1 = 0,2 \times (12,7)^2 = \underline{\underline{32 \text{ cm}^3}}$$

A ce volume, il faut ajouter le volume (V2) du trou d'injection, qui vaut (équation 4.2) :

$$V2 = h \times \pi \times (r^2) \quad (\text{avec } h \text{ la longueur et } r \text{ le rayon}) \quad (4.2)$$

$$V2 = 2,5 \times \pi \times (1,25)^2 = \underline{13 \text{ cm}^3}$$

Puisqu'en moyenne 20 % des 50 ml de résine est effectivement injecté dans la fissure et que la densité de la résine vaut 1g/cm³, il est possible de calculer le volume final (équation 4.3) occupé par la mousse (Vf), le volume initial de résine (Vi) et le facteur d'expansion (EXP) :

$$Vf = V1 + V2 = \underline{45 \text{ cm}^3} \quad (4.3)$$

$$Vi = 20\% \times 50 = \underline{10 \text{ cm}^3}$$

$$EXP = Vf / Vi = \underline{4,5}$$

Malgré les pertes, le montage permet donc d'obtenir un bon confinement de la mousse. Le facteur d'expansion passe en effet de 30, en condition non confinée (essai de compatibilité), à 4 ou 5 en condition confinée, ce qui est réaliste si l'on se réfère à l'application sur chantier.

Tous les essais montrent aussi que la pression générée lors de l'expansion de la mousse augmente rapidement jusqu'à atteindre un maximum (Fig. 4.15). Puis la pression diminue progressivement. Le fait d'enlever le moule n'annule pas, semble-t-il, le confinement latéral de la mousse puisque la chute de pression correspond seulement à l'annulation de la compression due au serrage du moule (20 kPa). Pendant la réaction, un peu de mousse sort du moule d'injection (Photo 4.5). Cela a pour effet de baisser légèrement la pression avant que la mousse ne durcisse.

On a aussi considéré que le temps de réaction correspondant à la pression maximum correspond à la fin de l'expansion, donc au temps de réaction final (TF). La réaction est alors rapide dans tous les cas (TF(20°C) = 2 min et 3 min 30 s < TF(5°C) < 5 min 30 s).

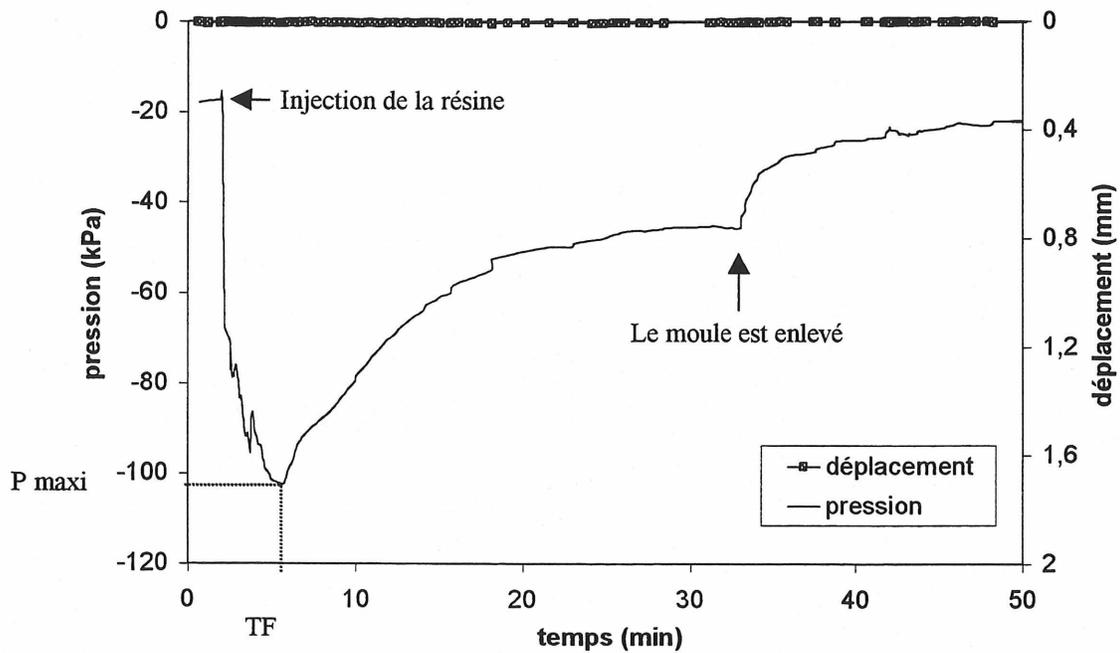
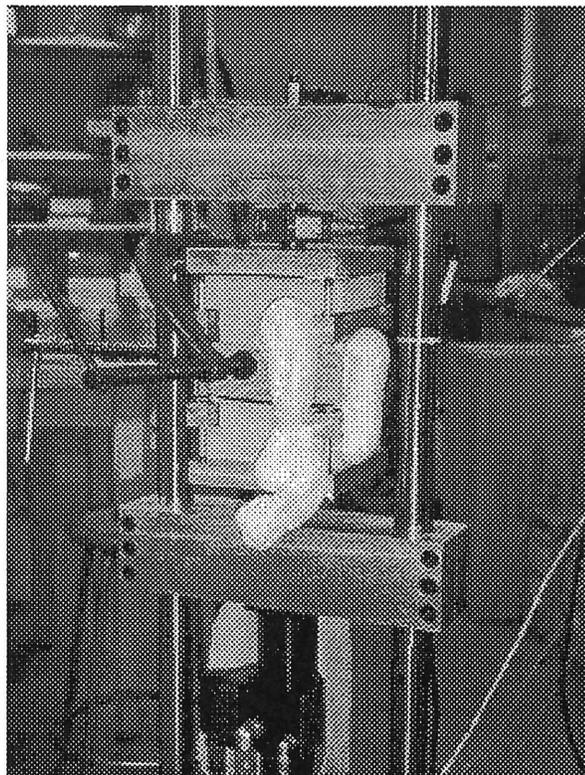


Figure 4.15 Évolution de la pression pendant l'injection - échantillon SRA18 (convention compression = pression négative)

Photo 4.5 Injection d'un échantillon avec la résine PF 930



b) Injection de la résine hydrophobe semi-rigide H 100

Au total, 16 échantillons ont été injectés avec la résine H100. Les deux premiers essais ont été réalisés sur des fissures de 5 mm d'ouverture, à 20°C et les suivants sur des fissures de 2 mm. Bien que de caractéristiques similaires (hydrophobes, semi-rigides) on retrouve quelques différences entre l'évolution de la pression d'injection des résines H100 et du PF 930.

Pour les essais effectués sur le H100, le pourcentage moyen de résine effectivement injectée, calculé sur 13 essais, était de 25 % (écart type : 5 %). En refaisant le même calcul que pour le PF 930, et toujours dans le cas d'une fissure de 2 mm d'ouverture, cela correspond à un facteur d'expansion de :

$$\text{EXP (H100)} = 45/(25\% \times 50)$$

$$\underline{\text{EXP (H100)} = 3,5}$$

Ce taux d'expansion est sensiblement plus faible que celui calculée pour le PF 930 (4,5). Ce résultat rejoint résultats obtenus en condition non confinée.

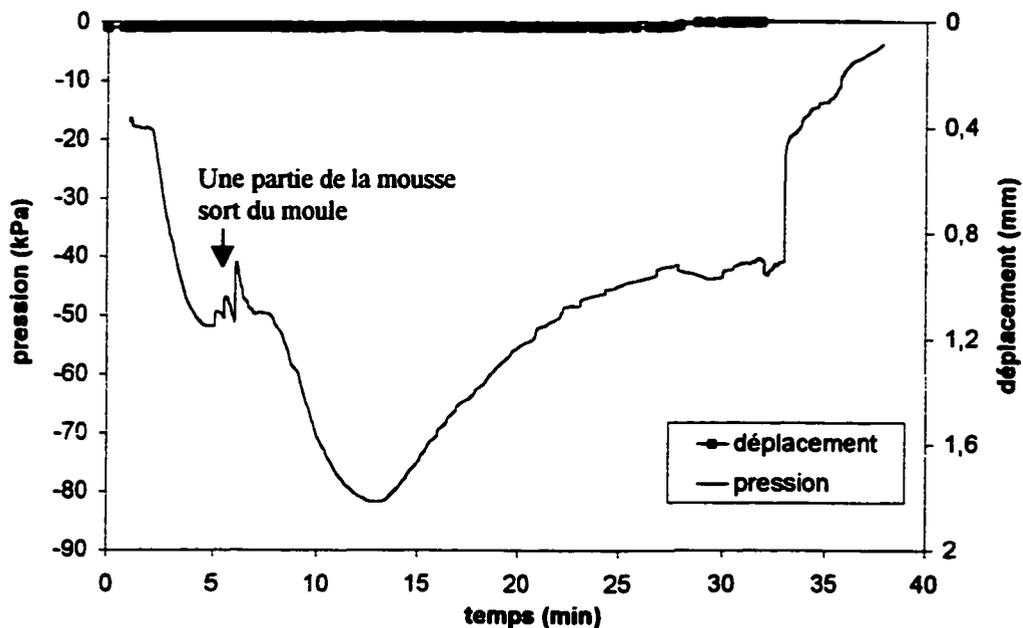


Figure 4.16 Évolution de la pression pendant l'injection de l'échantillon SRB15

Pendant la réaction d'expansion, la chute de pression est plus significative que pour le PF 930 lorsque qu'un peu de mousse sort du moule d'injection. Ceci s'explique par le fait que le temps

de réaction de la mousse est plus lent et que la mousse met plus de temps à durcir. Aussi, la pression générée par la mousse ne dépend pas uniquement de la quantité de mousse effectivement injectée dans la fissure, mais aussi du temps pendant lequel la mousse sort du moule. On ne retrouve donc pas, dans ce cas, de relation entre la pression générée lors de l'injection et la quantité de résine injectée. Le fait d'enlever le moule a, pour le cas de cette résine, un effet sur le confinement latéral de la mousse. Dans le cas de l'échantillon SRB15 par exemple (Fig. 4.16), le desserrage du moule produit une baisse de 20 kPa, puis a pour effet d'accélérer la chute de pression jusqu'à zéro.

Enfin, le temps de réaction final est généralement plus faible que pour le PF 930, soit $TF(5^{\circ}C) = 10 \text{ min}$ et $TF(20^{\circ}C) = 5 \text{ min}$.

c) Injection de la résine hydrophobe flexible F 1000

Trois essais seulement ont été effectués sur cette résine parce que les premiers essais de traction ont montré que l'adhésion de la mousse était très faible. La pression générée lors de l'injection se développe très rapidement. Une fois que la pression a atteint son maximum, elle chute jusqu'à un palier correspondant pratiquement à la pression initiale. Après le desserrage du moule, il ne reste plus de pression dans la fissure (Fig. 4.17).

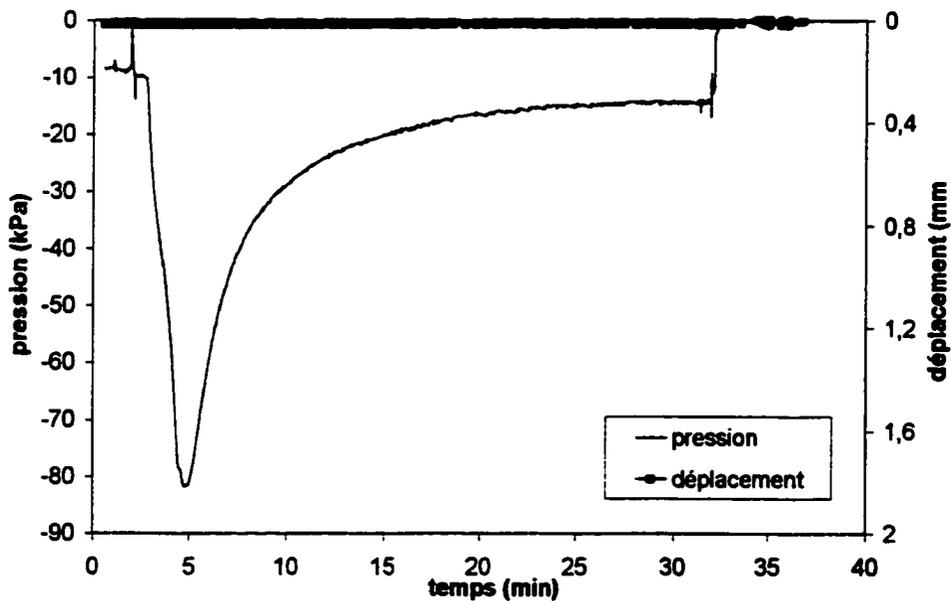


Figure 4.17 Évolution de la pression pendant l'injection de l'échantillon F3

d) Injection de la résine hydrophile 900 LVSF

Les essais d'injection sur la résine 900 LVSF ont été réalisés sur 18 échantillons. Dans le cas de la résine hydrophile, l'eau a été ajoutée au mélange à 1:1 en volume, soit 50 ml d'eau et 50 ml de résine. Le premier a été réalisé avec une fissure de 5 mm, puis tous les autres sur des fissures de 2 mm, à 5°C. Le pourcentage moyen de résine injectée, calculé sur 11 essais était de 35 % (écart type de 3%). En refaisant le même calcul que pour le PF 930 et le H100, et toujours dans le cas d'une fissure de 2 mm d'ouverture, cela correspond à un facteur d'expansion de :

$$\text{EXP (H100)} = 45/(35\% \times 50)$$

$$\underline{\text{EXP (H100)} = 2,5}$$

Pour cette résine, la variation de quantité injectée correspondait bien avec les différences de pression maximale enregistrées pendant l'injection (Fig. 4.18).

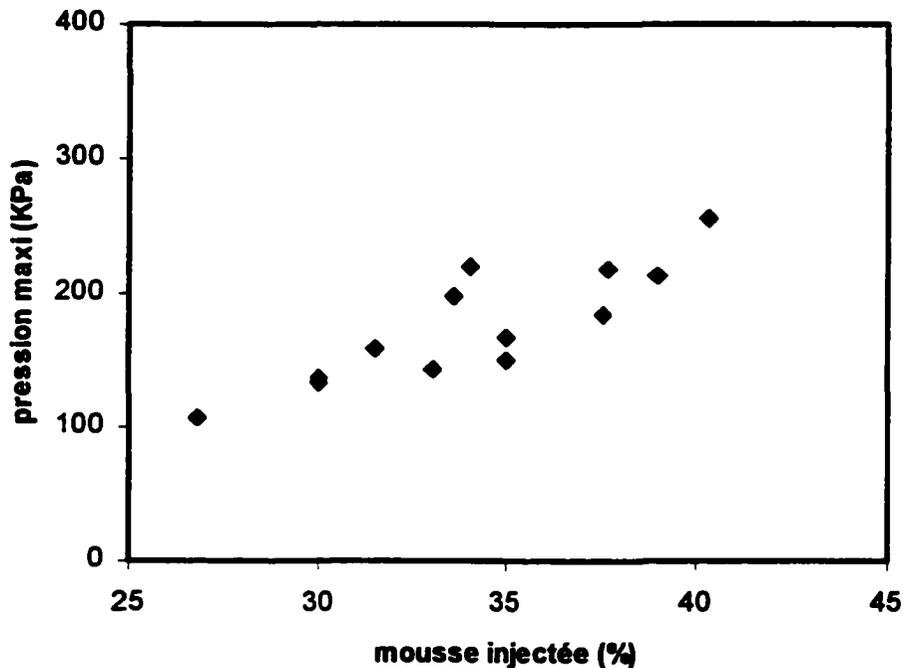


Figure 4.18 Pression maximum générée lors de l'injection du PR 900 LVSF en fonction de la quantité de mousse effectivement injectée. (12 essais sur fissures de 2 mm, à 5°C).

Le temps de réaction correspondant à la pression maximum était beaucoup plus long que pour les résines hydrophobes, soit de 25 à 95 minutes. L'augmentation de la pression se fait très

progressivement et atteint une valeur très élevée (100 à 200 kPa). Après avoir atteint son maximum, elle se stabilise ou diminue très lentement (Fig. 4.19). Le desserrage du moule produit une baisse importante de la pression pour cette mousse flexible, mais celle-ci étant élevée au départ, la pression ne retombe pas à zéro.

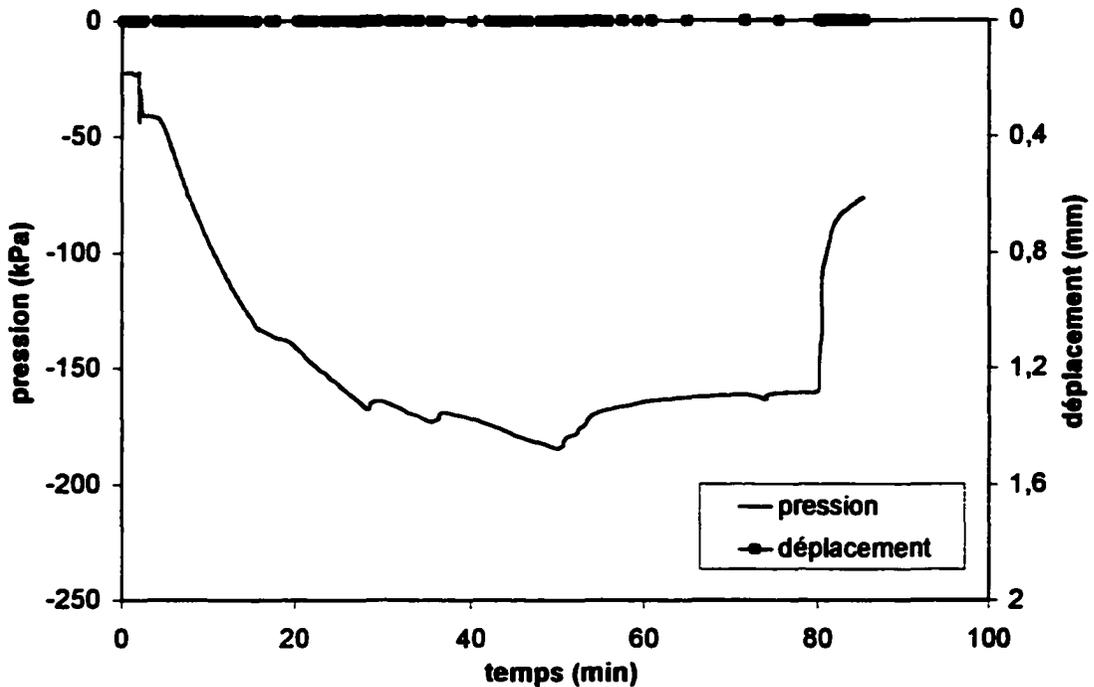


Figure 4.19 Évolution de la pression pendant l'injection de l'échantillon Hi17

4.2.4 Synthèse des résultats de l'injection

Pour tous les échantillons, on distingue les mêmes phases pendant l'injection :

Phase 1 - Avant l'injection : la contrainte de compression initiale mesurée (-20 kPa) est due au serrage du moule.

Phase 2 - Après l'injection : la réaction de la résine produit une augmentation progressive de la pression. Cette dernière est si élevée qu'un peu de mousse peut sortir éventuellement du moule d'injection.

Phase 3 - Après la fin de la réaction : Lorsque l'expansion de la mousse est terminée, la pression diminue rapidement (résine hydrophobe) ou se stabilise (résine hydrophile) ;

Il est plutôt hasardeux de faire le lien avec ce qui se passe réellement in-situ lors de l'injection. En effet, il est difficile de comparer le confinement de la mousse dans le montage et avec celui in-situ. Cependant, il est possible de tirer des commentaires intéressants de ces résultats d'injection.

Tout d'abord, le montage permet effectivement d'obtenir un bon confinement de la mousse puisque pour les résines hydrophobes semi-rigides, le facteur d'expansion, qui variait de 20 à 30 en expansion libre, a fortement diminué, atteignant la valeur de 3 à 5 lorsqu'elle est confinée dans la fissure. Pour la résine hydrophile, le confinement est moins marqué, puisque le facteur d'expansion n'est déjà pas très élevé en condition non confinée (4) : il est passé à 2,5 en condition confinée. Aussi, on a pu observer que pendant l'injection de la fissure, la pression développée dans le cas d'une résine hydrophile est beaucoup plus forte que dans le cas d'une résine hydrophobe (Fig. 4.20).

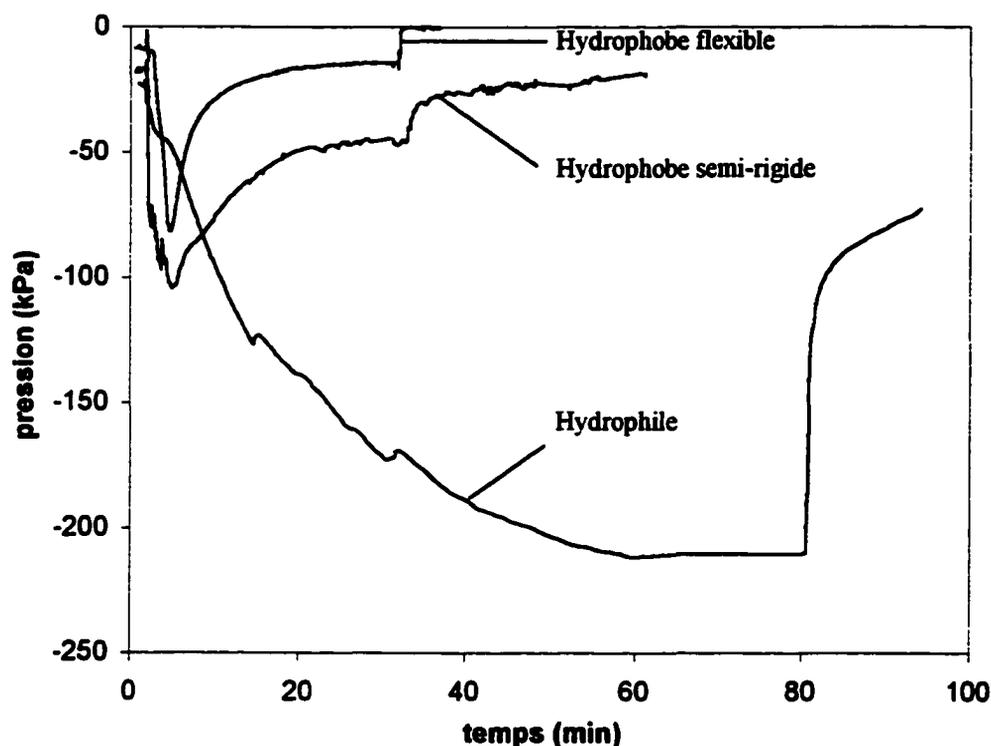


Figure 4.20 Comparaison de l'évolution de la pression pendant l'injection de trois échantillons hydrophobes semi-rigide, hydrophobe flexible et hydrophile.

Cela va à l'inverse de ce à quoi on pouvait s'attendre après les essais de compatibilité, puisque ces derniers ont montré que l'expansion de la mousse hydrophile était beaucoup plus faible (EXP=4) que celle des mousses hydrophobes (EXP=20 à 30). En fait, c'est le temps de réaction qui joue également un rôle important. Un temps de réaction plus lent permet à la pression de se développer plus longtemps.

Aussi, dans le cas de la mousse hydrophile, la pression se maintient après avoir atteint son maximum alors qu'elle diminue dans le cas des mousses hydrophobes. Le fait que la mousse hydrophile soit saturée en eau explique peut-être ce phénomène.

Enfin, ces essais montrent le rôle important joué par la pression de la mousse qui exerce une action mécanique sur le béton, tel que décrit par JOYCE [1992]. Cependant, ces essais n'ont pas permis de comparer les quatre produits, puisque la pression développée dépend de beaucoup de facteurs, notamment de la quantité de résine injectée, du confinement et du temps de réaction de la mousse.

4.3 Essais de traction

4.3.1 Essais préliminaires sur échantillons de béton secs

Deux échantillons de béton, dont la fissure était sèche au moment de l'injection, ont été injectés avec de la résine hydrophobe PF 930 et testés en traction (Tableau 4.2). Cette condition n'est pas réaliste car dans les conditions retrouvées sur le chantier d'injection, la fissure est toujours humide. Cependant, ces essais préliminaires ont permis de faire la comparaison avec l'essai réalisé dans des conditions humides.

TABLEAU 4.2 RÉSULTATS DES DEUX ESSAIS DE TRACTION SUR LA RÉSINE PF 930 – ÉCHANTILLONS SECS

Échantillon	Condition et ouverture de la fissure	ϵ_r (%)	σ_r (KPa)
SRA1	Sec, 8 mm	12	136
SRA2	Sec, 5 mm	13	106

Les deux premiers essais montrent que la rupture en traction a lieu dans la mousse, qui se déchire progressivement. (cf. photos en annexe C).

L'adhésion de la mousse au béton sec est donc suffisamment élevée pour éviter la rupture de l'étanchéité au contact béton-mousse. Dans ces essais, l'ordre de grandeur du module de déformation de la mousse était de 1000 kPa (Fig. 4.21).

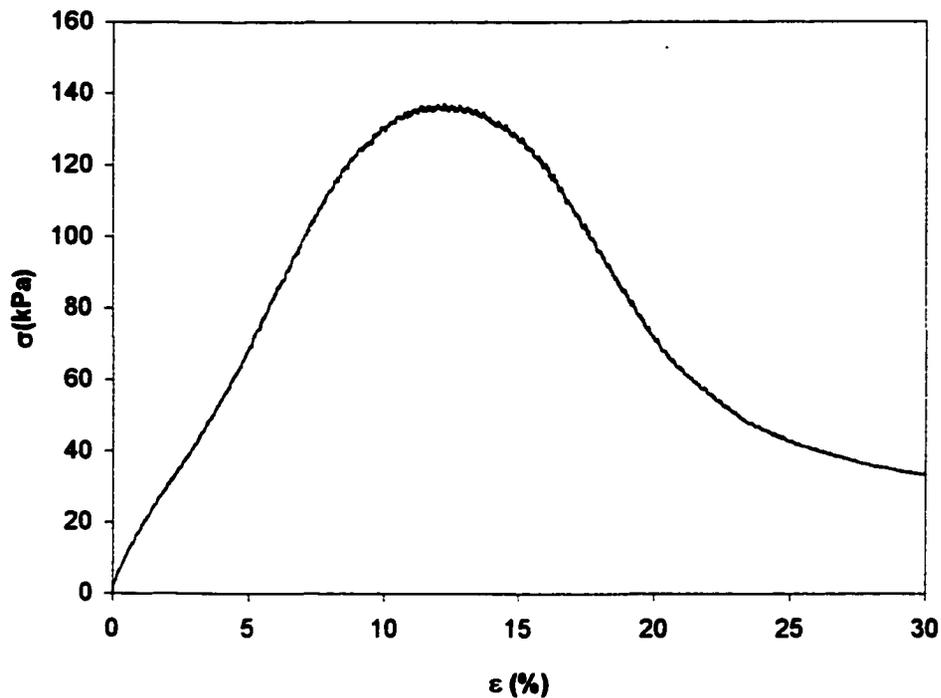


Figure 4.21 Essai de traction sur l'échantillon SRA1 (échantillon sec)

4.3.2 Essais sur échantillons humides

a) Résine hydrophobe semi-rigide H100 et PF 930

Au total, 20 essais de traction ont eu lieu sur des fissures de 5 et 2 mm d'ouverture et dans des conditions variables de température, à 20°C ou 5°C (Tableau 4.3).

La rupture de tous les échantillons s'est produite cette fois au contact de la mousse et du béton (rupture adhésive). L'adhésion de la mousse est très faible : les essais réalisés sur des fissures de 5 mm montrent que la résistance varie de 5 à 9 kPa, alors que pour ceux réalisés sur des fissures de 2 mm montrent que la résistance varie de 8 à 15 kPa suivant les essais. La déformation à la rupture est en moyenne de 3 % et varie beaucoup suivant les échantillons de 1 à 6 %.

TABLEAU 4.3 RÉSULTATS DES ESSAIS DE TRACTION SUR LES RÉSINES SEMI-RIGIDES PR 930 ET H100- ÉCHANTILLONS HUMIDES

N° Ech.	Fissure : T (°C), e (mm)	ϵ_r	σ_r (kPa)	N° Ech.	Fissure : T (°C), e (mm)	ϵ_r	σ_r (kPa)
SRA3	20°C, e= 5 mm	3	6	SRB1	20°C, e= 5 mm	1,5	9
SRA4	20°C, e= 5 mm	1	6	SRB2	20°C, e= 5 mm	3	9
SRA5	20°C, e= 5 mm	2	5	SRB3	5°C, fermée	-	42
SRA9	5°C, e= 2 mm	4	11	SRB4	5°C, e= 2 mm	3	11
SRA10	5°C, e= 2 mm	5	10	SRB5	5°C, e= 2 mm	3	8
SRA15	5°C, e= 2 mm	6	9	SRB9	5°C, e= 2 mm	6	10
SRA16	5°C, e= 2 mm	4	11	SRB10	5°C, e= 2 mm	-	-
SRA17	5°C, e= 2 mm	3	9	SRB11	5°C, e= 2 mm	3	3
SRA18	5°C, e= 2 mm	1	30	SRB12	5°C, e= 2 mm	19	9
SRA19	5°C, e= 2 mm	3	8	SRB13	5°C, e= 2 mm	3	15

L'analyse des résultats en termes de module de déformation est difficile, parce que le module varie beaucoup d'un essai à l'autre. Cette variation est probablement due au fait que la densité de la mousse obtenue après l'injection est très variable suivant la quantité de mousse effectivement injectée dans la fissure. De plus, il est difficile de mesurer le module de déformation initial, la courbe n'étant pas toujours bien linéaire. Pour l'interprétation, il est donc préférable de retenir la déformation moyenne à la rupture (3 %), qui donne un ordre de grandeur. L'allure de la courbe contrainte-déformation est très différente de celle observée sur l'échantillon sec. La rupture par décollement est rapide (Fig. 4.22), contrairement à l'essai sur l'échantillon sec, où la rupture par déchirement de la mousse est progressive.

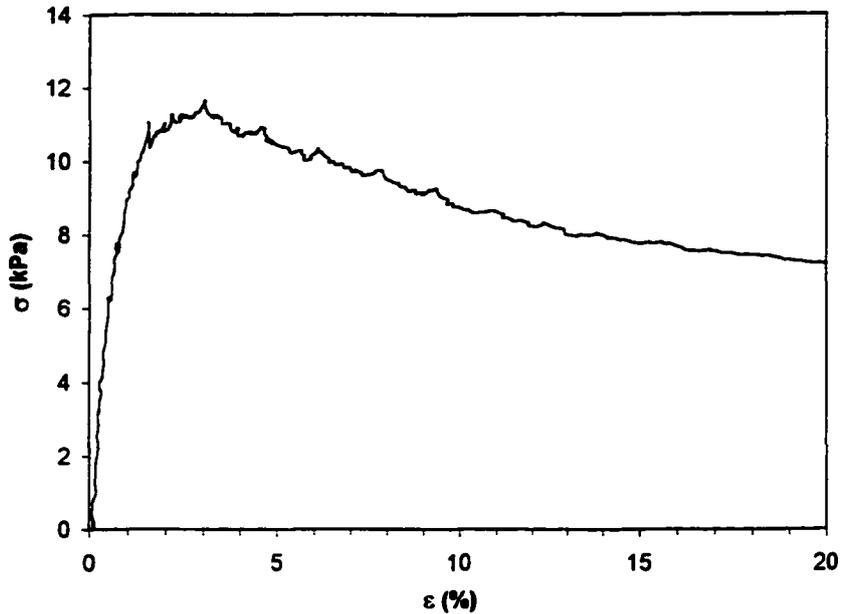


Figure 4.22 Essai de traction sur l'échantillon SRB4 (échantillon humide)

b) Résine hydrophobe flexible F1000

Pour cette résine, seuls deux essais de traction ont été réalisés sur des échantillons humides, à 20°C. Ils ont montré que la résistance à la traction de la mousse est quasi nulle (Tableau 4.4). Comme pour les mousses semi-rigides, la rupture se produit à chaque fois au contact béton-mousse. Cette mousse flexible possède donc une très mauvaise adhérence au béton humide.

TABLEAU 4.4 RÉSULTATS DES 2 ESSAIS DE TRACTION SUR LA RÉSINE F1000

N° Ech.	Fissure : T (°C), e (mm)	ε _r (%)	σ _r (kPa)
F1	20°C, 5 mm	2	1
F2	20°C, 5 mm	3	1

c) Résine hydrophile flexible PF 900 LVSF

- Essais de traction après retrait au séchage

Les essais de compatibilité ont montré que la mousse hydrophile, contrairement aux mousses hydrophobes, subissait un important retrait lorsqu'elle est soumise au séchage. Les premiers essais réalisés sur des échantillons de béton fracturés (Hi1 et Hi2) ont donc eu pour objectif

d'observer l'effet de ce retrait, mais cette fois-ci lorsque la mousse hydrophile est confinée dans une fissure.

Le premier essai (Hi1) a été réalisé sur une fissure de 5 mm d'ouverture. La pression maximum enregistrée (90 kPa) est retombée rapidement à zéro lorsque le moule d'injection a été enlevé. Puis, au bout de quelques heures à température ambiante, la mousse s'est décollée du béton, laissant une fissure de 2 mm au bas de l'échantillon. En séchant, le retrait de la mousse a donc provoqué la rupture de l'injection au contact béton-mousse comme dans l'essai de compatibilité. Dans ce cas, l'adhérence de la mousse au béton humide n'est pas suffisante pour éviter le retrait de la mousse.

Le deuxième essai a été réalisé, cette fois sur une fissure de 2 mm d'ouverture et à 5°C (Fig. 4.23). Après l'injection, la pression a augmenté jusqu'à 150 kPa, est descendue brusquement de 50 kPa lorsque le moule a été enlevé, puis a continué à descendre progressivement pendant 7 jours (Fig.4.25), en passant d'un état de compression à un état de traction au bout de 15 heures (Fig. 4.24 et 4.25). Pendant cette période, la mousse a continué à adhérer au béton. C'est pourquoi le retrait de la mousse a inversé le phénomène et a donc produit un état de traction au sein de la fissure. Après 7 jours, la pression s'est stabilisée à 40 kPa en traction.

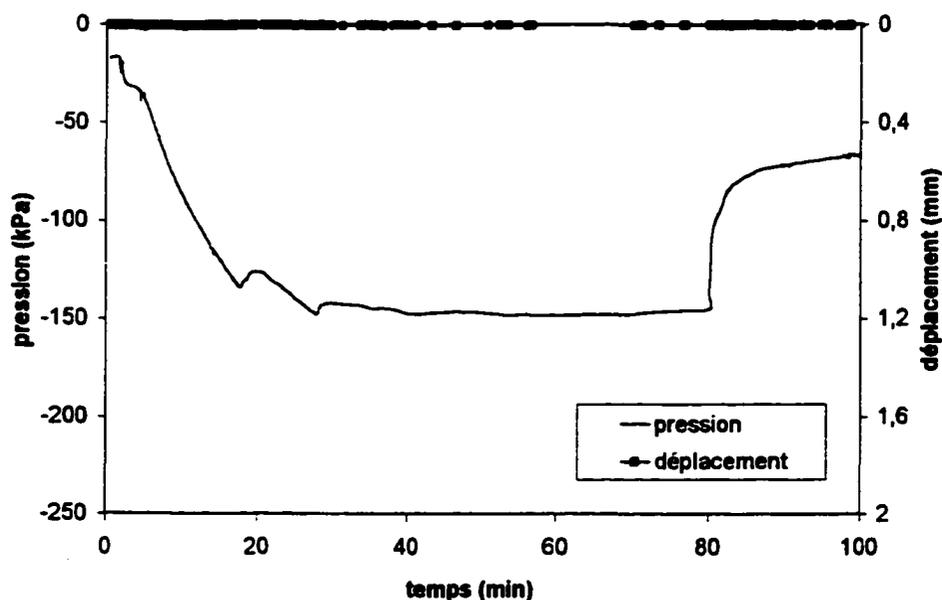


Figure 4.23 Évolution de la pression pendant l'injection (# Hi2)

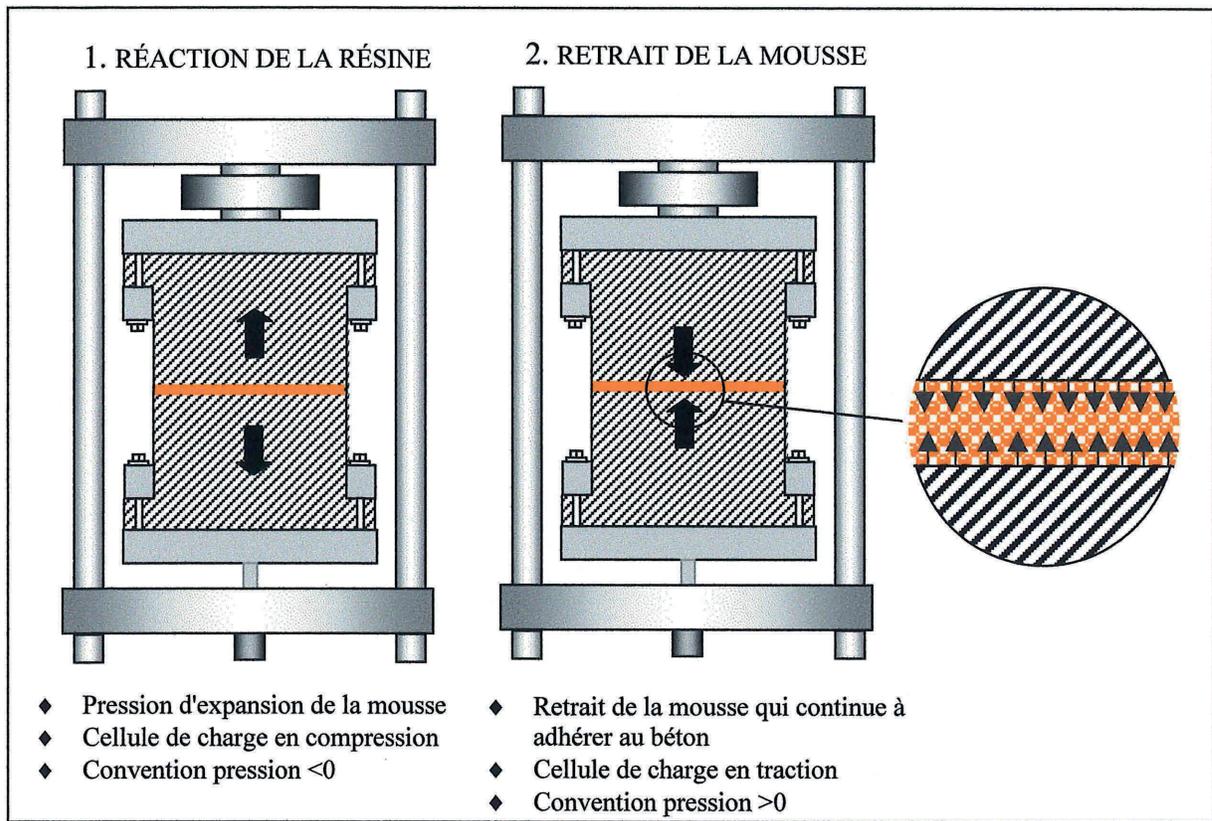


Figure 4.24 Changement de signe de la pression enregistrée entre la réaction de la résine et son retrait (# Hi2)

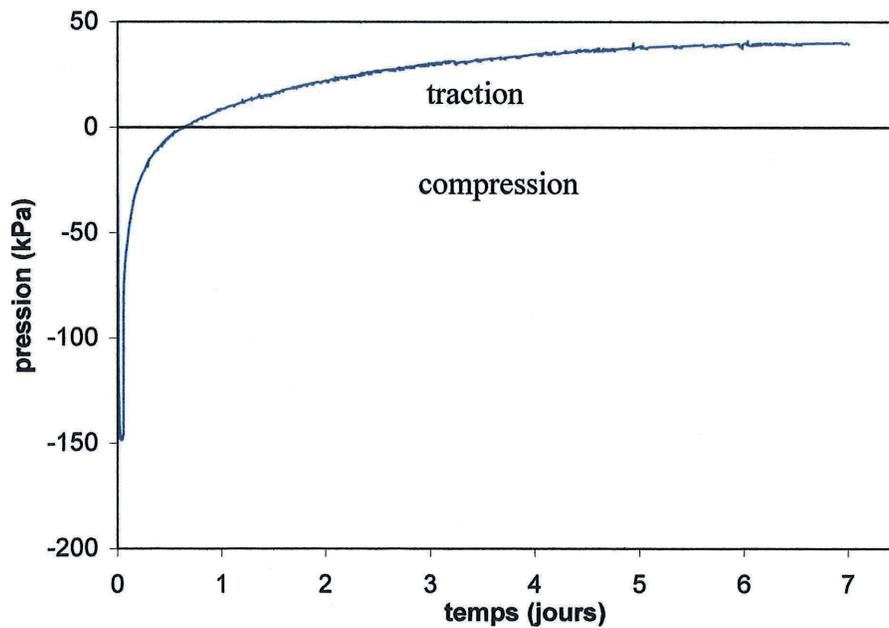


Figure 4.25 Évolution de la pression pendant le retrait de la mousse (# Hi2)

Un essai de traction a ensuite été réalisé (Fig. 4.26). Cet essai montre que malgré le retrait de la mousse, celle-ci a continué à adhérer au béton. La rupture s'est produite par décollement de la mousse, à une contrainte de 80 kPa et une déformation de 25%.

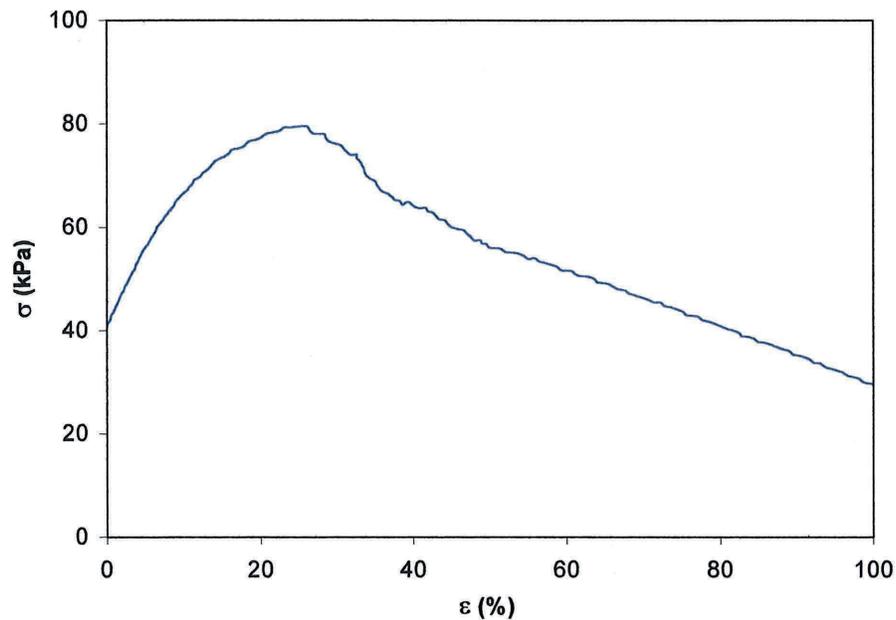


Figure 4.26 Essai de traction sur l'échantillon Hi2

Après la rupture, on constate que l'échantillon a subi un retrait volumétrique. L'eau s'est retirée de la mousse sur les bords de l'échantillon (Photo 4.6).

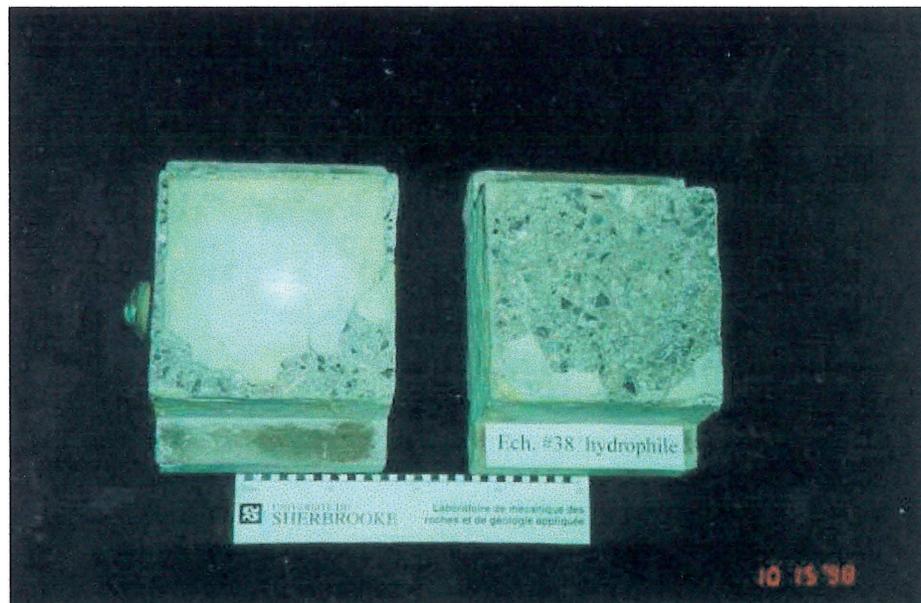


Photo 4.6 Échantillon Hi2 après la rupture

- Essai de traction juste après l'injection

Au total, 6 essais de traction ont eu lieu sur des fissures d'ouverture 5 mm (1 essai) et 2 mm (5 essais) à la température de 5°C (Tableau 4.5). L'essai a été réalisé juste après l'injection, comme pour les mousses hydrophobes. Tous les échantillons ont atteint la rupture suivant le contact béton-mousse.

TABLEAU 4.5 RÉSULTATS DES ESSAIS DE TRACTION SUR LA RÉSINE PF900 LVSF

N° Ech.	Fissure :T (°C), e (mm)	ε_r (%)	σ_r (kPa)
Hi3	5°C, e= 5 mm	50	29
Hi4	5°C, e= 2 mm	47	29
Hi6	5°C, e= 2 mm	30	26
Hi11	5°C, e= 2 mm	22	23
Hi13	5°C, e= 2 mm	24	-13
Hi18	5°C, e= 2 mm	21	5

Dans l'ensemble, ces essais montrent que la résine hydrophile possède une meilleure adhérence au béton humide que les mousses hydrophobes. Même constatation aussi pour la déformation à la rupture, qui est beaucoup plus forte (20 à 50 %) que celle des résines hydrophobes.

Après l'injection des échantillons, une pression s'est maintenue dans la fissure. Au début de l'essai de traction la mousse est donc encore en compression (Fig. 4.27). Or, cette pression influence beaucoup la déformation à la rupture : plus la pression est forte, plus la déformation à la rupture est élevée. Pendant l'essai de traction, on constate qu'il faut en effet une certaine déformation pour que la contrainte passe de l'état de compression à l'état de traction, puis une déformation supplémentaire pour amener finalement la mousse à la rupture en traction.

Sur certains échantillons la pression de confinement était tellement élevée au départ (Hi13 et Hi18) que la rupture en traction s'est produite alors que la mousse était encore en compression ou juste en traction. C'est pour cela qu'il est difficile de faire une moyenne des résistances à la rupture. En revanche, il est possible de choisir la déformation à la rupture comme paramètre représentatif (20 à 50%).

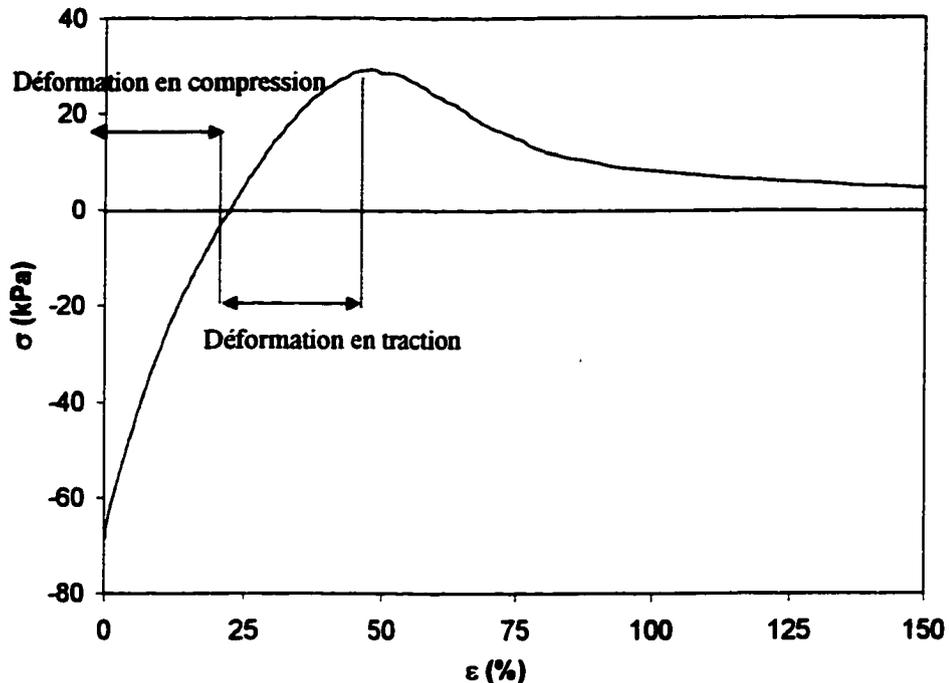


Figure. 4.27 Essai de traction sur l'échantillon Hi 4

4.3.3 Synthèse des résultats des essais de traction

Les essais de traction réalisés sur quatre résines polyuréthane ont donc permis d'observer le type de rupture, d'obtenir un ordre de grandeur de l'adhérence des résines au béton humide et de mesurer la déformation à la rupture en traction.

L'interprétation des essais est cependant rendue difficile par le fait que certains facteurs sont encore mal connus. En particulier, on contrôle mal la pression de confinement résiduelle après l'injection. Or cette pression influence beaucoup la déformation à la rupture : plus la pression est forte, plus la déformation à la rupture est élevée.

Pour les résines hydrophobes, les essais réalisés sur des échantillons secs ont été effectués seulement à des fins de comparaison, puisque dans la réalité, cette condition ne se retrouve pas. Lorsque la résine est injectée dans une fissure sèche, la rupture en traction se produit au sein de la mousse par déchirement. La résistance en traction mesurée dans les conditions d'essais choisies

sur une mousse semi-rigide est alors de l'ordre de 100 kPa et la déformation à la rupture de l'ordre de 10 %. Par contre, dans le cas où la fissure est humide, la rupture en traction se produit systématiquement au contact de la mousse et du béton, par décollement. Dans ce cas, l'adhérence de la mousse et la déformation à la rupture varient beaucoup suivant les quatre résines testées (Fig. 4.28).

- Pour la résine hydrophile, l'adhésion au béton humide varie de 20 à 40 kPa et la déformation à la rupture de 20 à 50 % ;
- Pour les deux résines hydrophobes semi-rigides, l'adhésion au béton humide varie de 5 à 10 kPa et la déformation à la rupture de 2 à 5 % ;
- Pour la résine hydrophobe flexible, l'adhésion au béton humide et la déformation à la rupture sont quasi nulle.

Pour les résines hydrophobes, l'adhérence par action chimique de la mousse sur le béton décrite par JOYCE [1992] est donc quasi nulle. Par contre, l'action physique et chimique est importante dans le cas des résines hydrophiles : la mousse s'ancre mieux dans les irrégularités de la fissure.

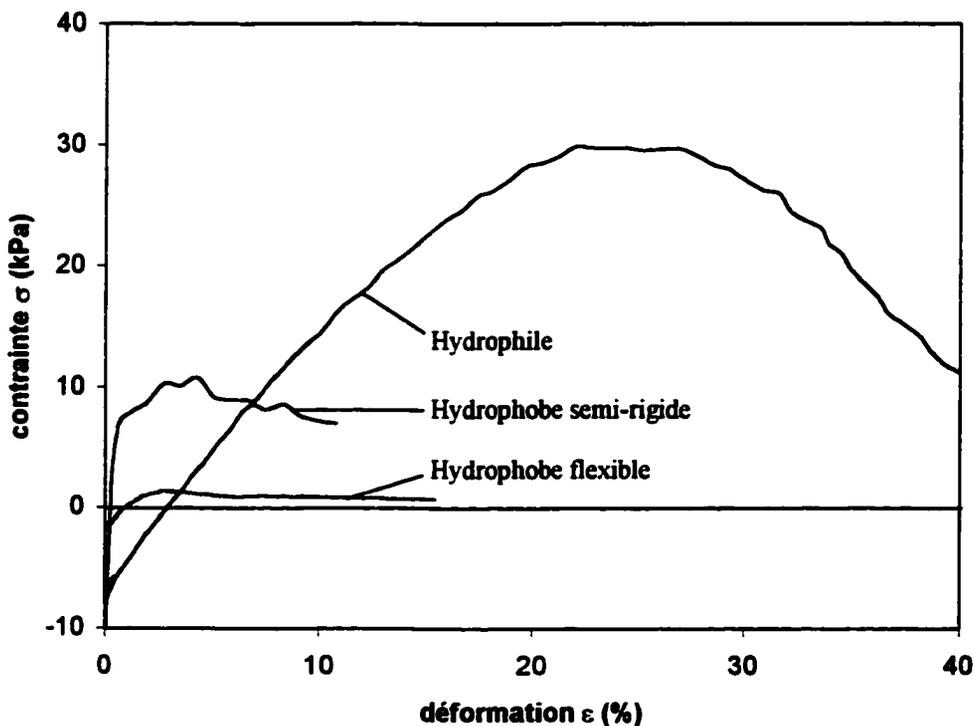


Figure 4.28 Comparaison de trois courbes de traction pour trois résines hydrophobes semi-rigide (SRA-16), hydrophobe flexible (F2) et hydrophile (Hi9).

Une autre information sur le comportement de la résine hydrophile nous a été donnée par deux essais, où la mousse a été préalablement laissée à température ambiante de façon à pouvoir observer si le retrait au sein d'une fissure injectée est comparable à celui observé dans les essais de compatibilité. Le premier essai, réalisé avec une fissure de 5 mm, a montré que le retrait de la mousse produit un décollement de la mousse au bout de quelques heures. Par contre, le deuxième essai, réalisé avec une fissure de 2 mm a montré que malgré le retrait de la mousse, celle-ci continue à bien adhérer au béton et qu'elle conserve une bonne résistance en traction au bout de 7 jours.

Enfin, l'ordre de grandeur des valeurs de résistance et de déformation à la rupture permettent d'ajuster les paramètres de l'essai suivant : l'essai cyclique.

Les résines hydrophobes possèdent une résistance en traction et une déformation à la rupture si faible qu'il n'est pas nécessaire de faire des essais cycliques en sollicitant la mousse en traction. Si la résine est injectée en période estivale, au moment où les fissures sont les plus fermées, on peut s'attendre à ce que la rupture se produise peu après l'ouverture des fissures. Par contre, si l'injection a lieu en période hivernale, la mousse sera sollicitée en compression en premier, puis doit reprendre sa forme originale lorsque la fissure s'ouvre à nouveau. Dans les essais cycliques décrits ci-après, l'ouverture de fissure initiale est considérée comme l'ouverture maximum.

Par contre, la résine hydrophile possède une déformation à la rupture plus grande en traction (20 à 50 %). Deux cas de déplacements cycliques ont donc été étudiés : un cas où la mousse est sollicitée en compression seule, comme pour les résines hydrophobes, et un cas où elle est sollicitée à la fois en compression (75 %) et en traction (25%).

4.4 Essais cycliques de compression et décompression

4.4.1 Essais sur les résines hydrophobes semi-rigides

Les essais de traction nous ont montré qu'il était intéressant d'étudier seulement le cas où l'injection a lieu lorsque la fissure est à son ouverture maximum. Nous avons donc réalisé 30 cycles de compression-décompression, d'amplitude 2 mm pour les fissures de 5 mm et de 1 mm

pour les fissures de 2 mm. Lorsque cela était possible, c'est-à-dire lorsque l'échantillon n'était pas brisé visuellement après les 30 cycles, un essai de traction a également été fait pour voir l'endommagement de la mousse.

Six essais cycliques ont eu lieu sur la résine PF 930 et six sur la résine H100. Les résultats sont décrits dans le tableau 4.6 et les courbes de résultats sont présentées en annexe D. Pour expliquer l'interprétation des résultats, la section suivante montre l'interprétation d'un cas type de résultat, obtenu sur l'échantillon SRA14 (Fig. 4.29 à 4.33).

L'échantillon SRA14 a été soumis à 30 cycles de déplacements de 1mm d'amplitude. La figure 4.29 montre les deux premiers cycles de forme sinusoïdale qui ont été appliqués sur la mousse.

TABLEAU 4.6 RÉSULTATS DES ESSAIS DE TRACTION, APRÈS 30 CYCLES DE COMPRESSION-DÉCOMPRESSION (RÉSINES H 100 ET PF 900 LVSF)

Échantillon	Caractéristiques de l'essai	ϵ_r (%)	σ_r (kPa)
SRA7	30 cycles (0-2 mm)		
SRA8	30 cycles (0-2 mm) + traction	18	3
SRA11	30 cycles (0-1 mm)		
SRA12	30 cycles (0-1 mm) + traction	56	4
SRA13	30 cycles (0-1 mm)		
SRA14	30 cycles (0-1 mm) + traction	60	3
SRB6	30 cycles (0-1 mm) + traction	21	3
SRB7	30 cycles (0-1 mm) + traction	22	2
SRB8	30 cycles (0-1 mm)		
SRB14	30 cycles (0-1 mm) + traction	14	3
SRB15	30 cycles (0-1 mm) + traction	30	4
SRB16	30 cycles (0-1 mm) + traction	53	3

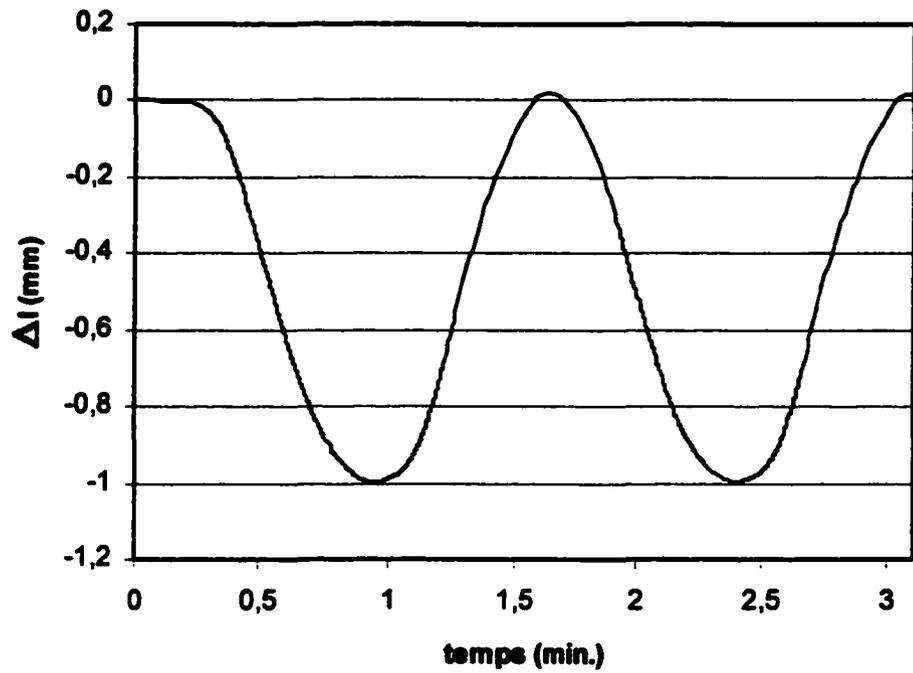


Figure 4.29 Deux premiers cycles de déplacement d'amplitude 1 mm (sur 30 cycles au total), Échantillon SRA-14

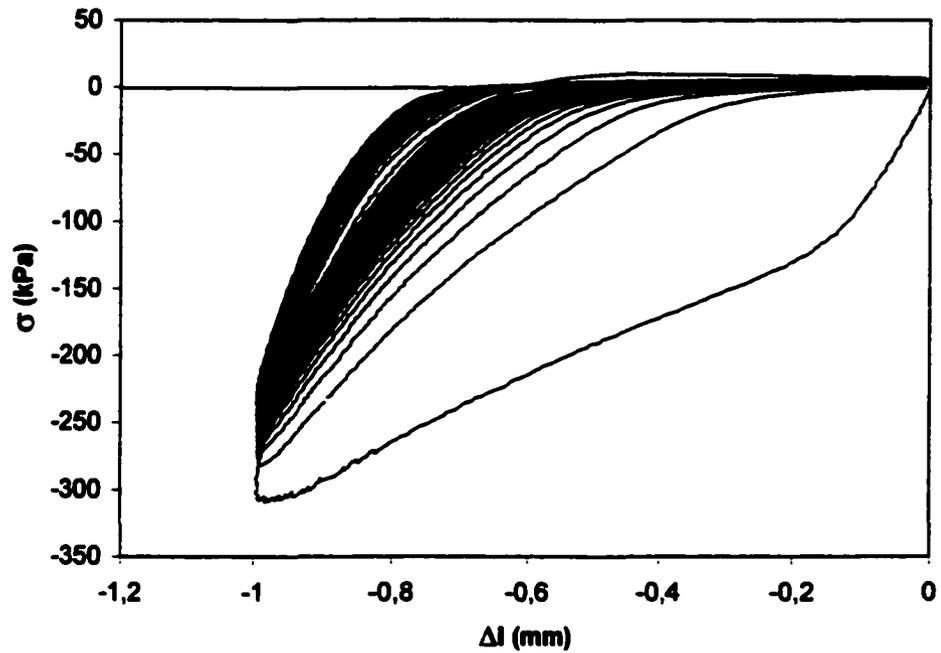


Figure 4.30 Essai cyclique (30 cycles de 1 mm) sur l'échantillon SRA 14

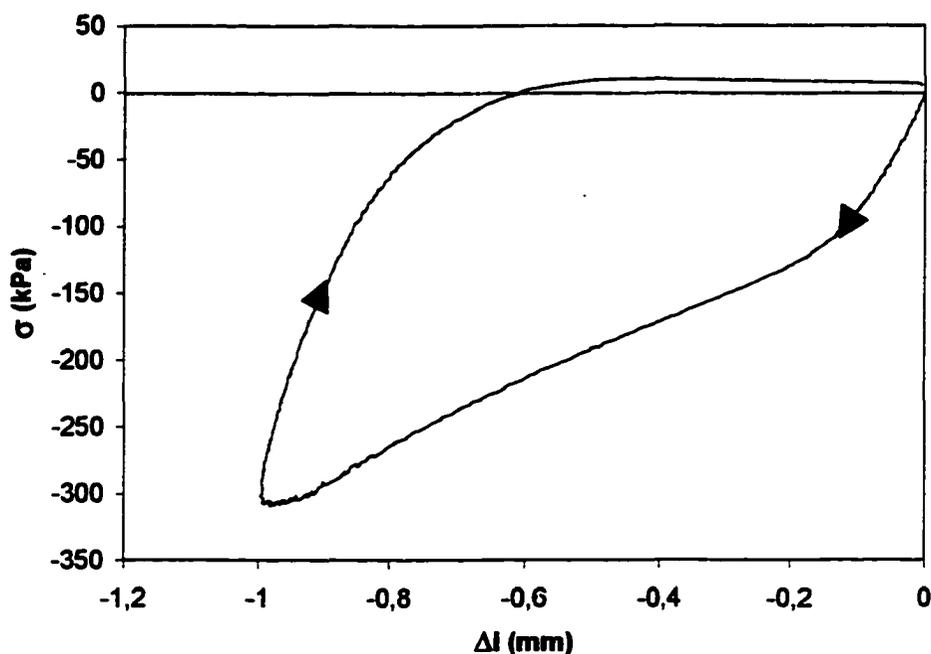


Figure 4.31 Premier cycle réalisé sur l'échantillon SRA-14

Lorsqu'on représente l'évolution de la contrainte en fonction du déplacement, il faut distinguer le premier cycle des autres (Fig. 4.30 et 4.31). Le premier cycle montre, en effet, que lorsque la mousse est comprimée à 50 % (1 mm), cela a pour effet de modifier et d'endommager de façon irréversible la structure de la mousse. Au début de la compression, la mousse offre un premier contact résistant, puis, à mesure que les bulles sont écrasées, la mousse offre moins de résistance. Lorsque toutes les bulles sont écrasées, la mousse tend à offrir à nouveau une grande résistance.

Lorsque l'on réouvre la fissure, la mousse ne reprend pas toute seule sa forme initiale puisqu'un effort de traction est développé à partir de $-0,6$ mm. Aussi, dès le premier cycle, la contrainte de traction de la mousse atteint l'adhérence maximum (10 kPa) de la mousse au béton humide. Il reste cependant une résistance résiduelle de la mousse (6 kPa), et visuellement la mousse continue d'adhérer au béton. La mousse a donc été partiellement endommagée dès le premier cycle.

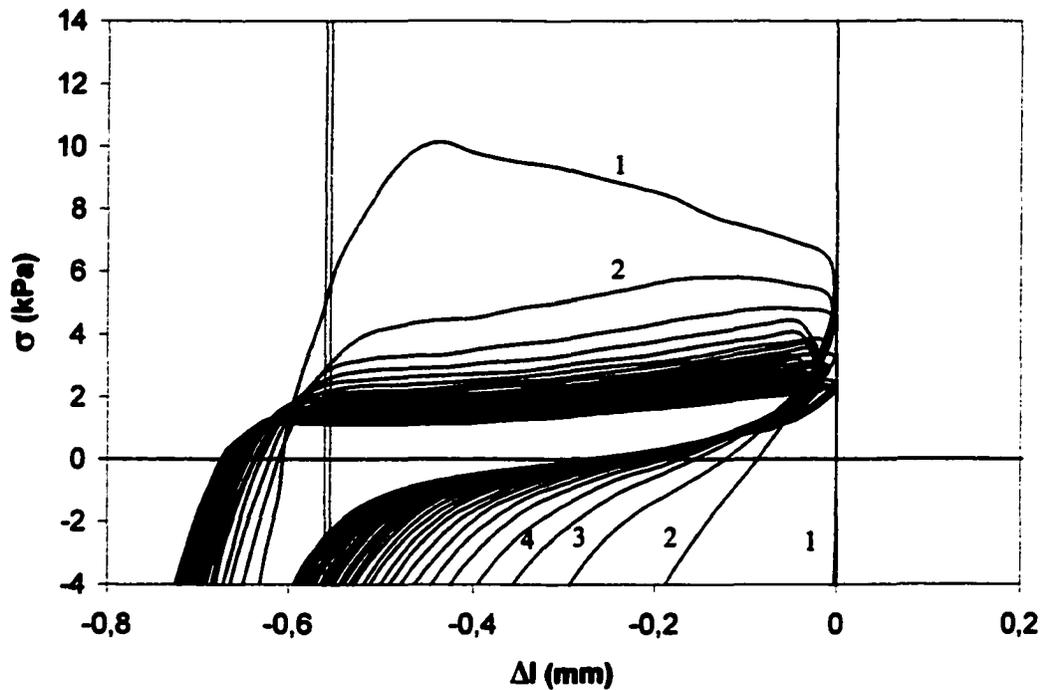


Figure 4.32 Essai cyclique SRA 14 – zone de traction de la mousse

Le tracé du cycle compression-décompression présente une surface importante, surtout pour le premier cycle, ce qui montre que beaucoup d'énergie n'est pas restituée lors de la décompression (Fig. 4.32).

Lors de ce premier cycle, le module de déformation initial de la mousse est de 1800 kPa. Puis, il diminue fortement pour les cycles suivants : 100 kPa à 2 cycles, 50 kPa à 3 cycles jusqu'à 10 kPa à 30 cycles. De même, la résistance en traction diminue de 10 kPa (1er cycle) à 2 kPa (30 cycles) (Fig. 4.33).

Après les 30 cycles de déplacement, on observe que la résistance en traction est très faible : 3 kPa à 50 % (Fig. 4.34).

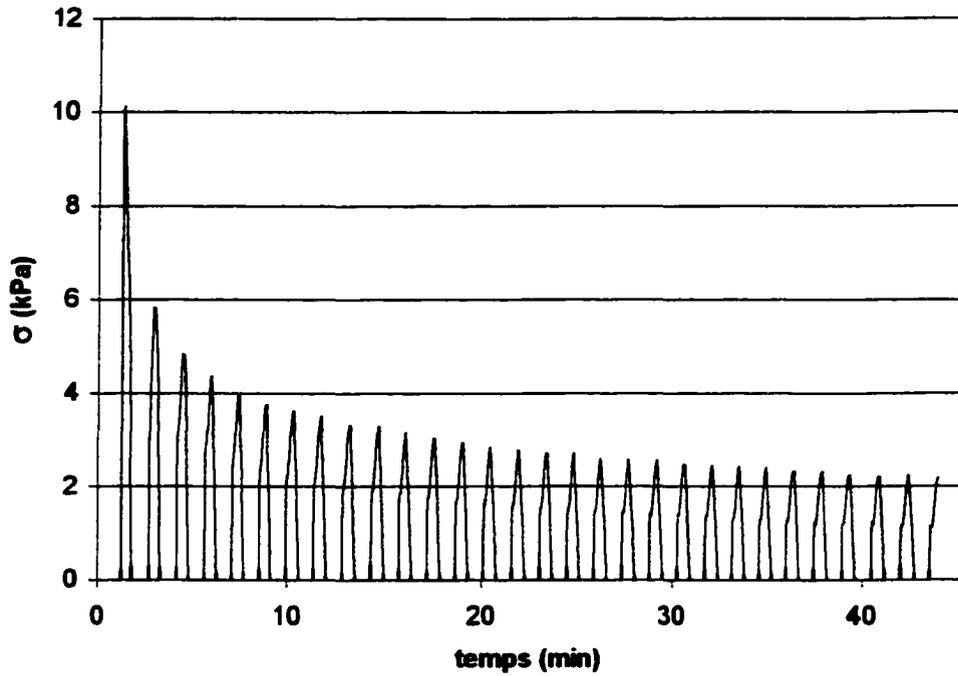


Figure 4.33 Évolution de la contrainte de traction en fonction du temps - Essai cyclique SRA 14

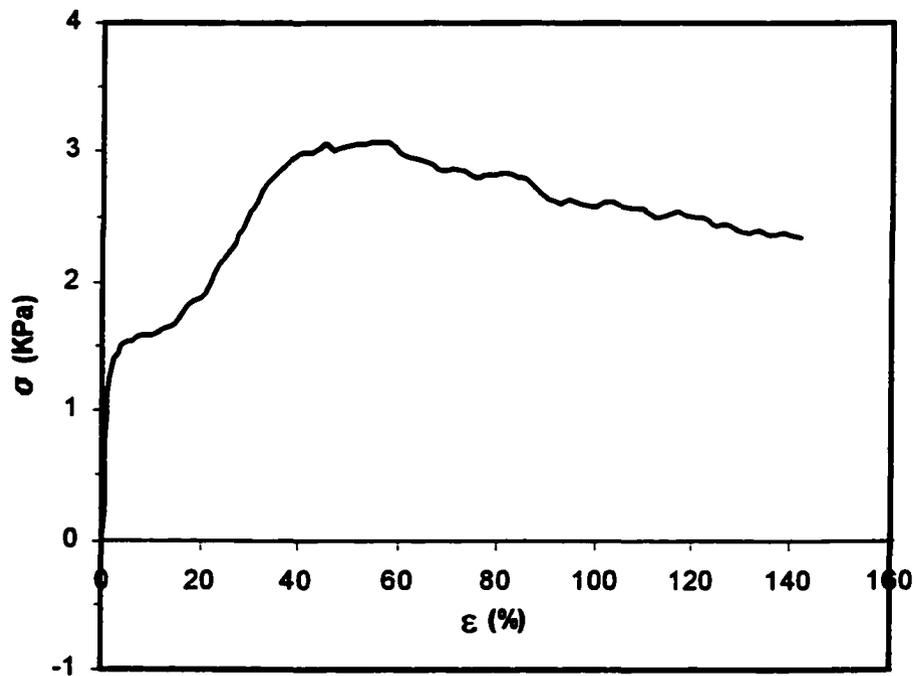


Figure 4.34 Essai de traction sur l'échantillon SRA14 après 30 cycles

4.4.2 Essai sur la résine hydrophobe flexible F 1000

Le comportement de la mousse flexible sous l'effet de cycles de compression est très différent de la mousse semi-rigide. L'échantillon est très fragile en traction, car son adhésion est quasi nulle.

L'essai cyclique montre le comportement plus élastique de ces mousses, qui ne sont pas endommagées lors de cycles de compression-décompression. Ainsi, la surface des cycles est plus faible (Fig. 4.35).

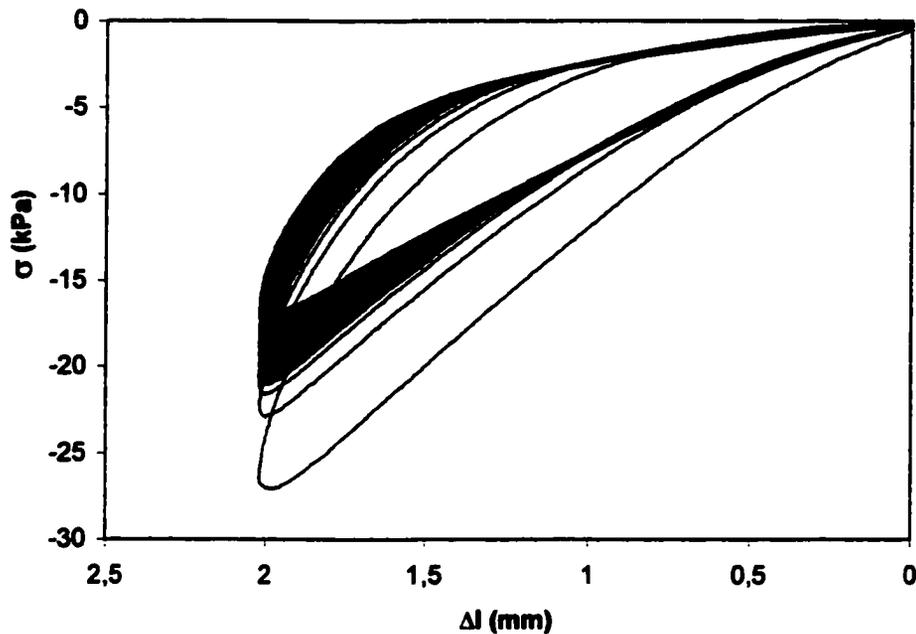


Figure 4.35 Essai cyclique (30 cycles de 2 mm) sur l'échantillon F 3

4.4.3 Essais sur la résine hydrophile PF 900 LVSF

Au total, huit essais cycliques ont eu lieu sur la résine hydrophile (Tableau 4.7). Tout d'abord, six essais en compression-décompression ont été réalisés. Ces essais montrent le comportement beaucoup plus élastique de ces mousses, qui sont moins endommagées que les résines semi-rigides lors de cycles de compression-décompression. Les cycles d'hystérésis ont en effet une surface plus faible (Fig. 4.36). De plus, aucun effort de traction n'est développé lors de la décompression, la mousse reprenant sa forme initiale. Après les 30 cycles, la résistance en traction de la mousse n'est pas du tout endommagée et atteint 30 kPa (Fig. 4.37).

TABLEAU 4.7 RÉSULTATS DES 7 ESSAIS DE TRACTION APRÈS 30 CYCLES DE COMPRESSION -DÉCOMPRESSION – 900 LVSF

Échantillon	Essai	ϵ_r (%)	σ_r (KPa)
Hi5	30 cycles (0-0.5 mm) + traction	19	8
Hi7	30 cycles (0-1 mm) + traction	52	9
Hi8	30 cycles (0-1 mm) + traction	40	35
Hi9	30 cycles (0-1 mm) + traction	23	30
Hi10	30 cycles (0-1 mm) + traction	25	7
Hi15	30 cycles (0-1 mm) + traction	20	-9
Hi 16	30 cycles (-0.3-0.6 mm)		
Hi17	30 cycles (-0.3-0.6 mm) + traction	8	6

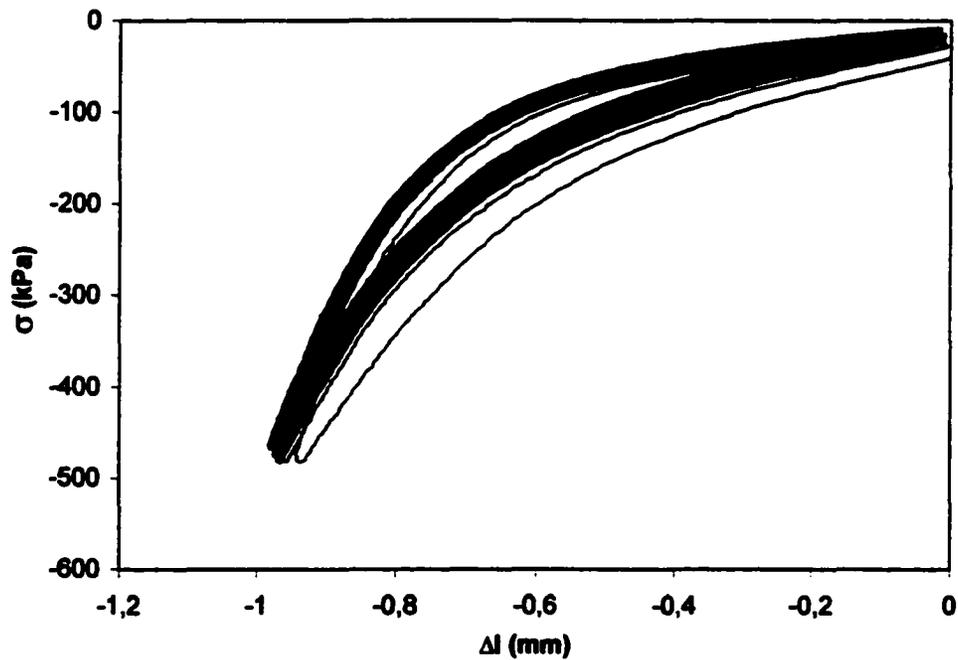


Figure 4.36 Essai cyclique de compression-décompression sur l'échantillon Hi9

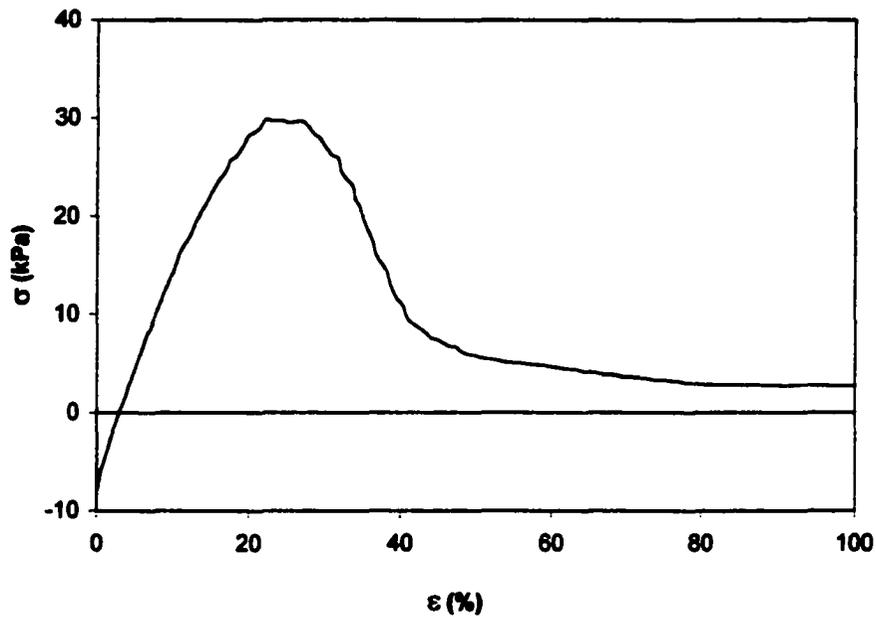


Figure 4.37 Essai de traction sur l'échantillon Hi9 après 30 cycles de compression-décompression

La résistance en traction de la mousse étant plus forte dans le cas de la mousse hydrophile, deux autres essais cycliques ont eu lieu, mais en sollicitant la mousse à la fois en compression et en traction (Fig. 4.38).

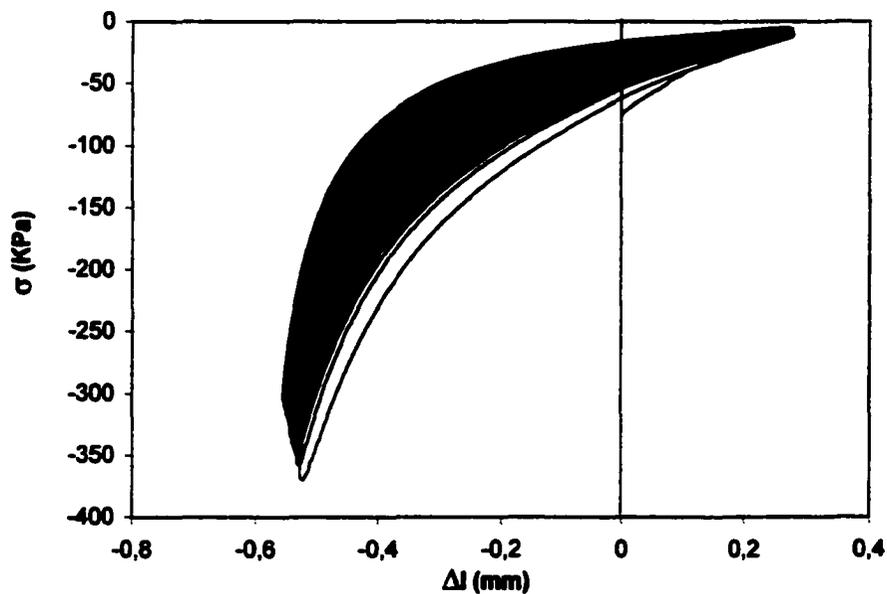


Figure 4.38 Essai cyclique de compression-traction sur l'échantillon Hi17

Pour ces essais, le même comportement élastique de la mousse hydrophile est observé. En revanche, les essais de traction réalisés après les 30 cycles montrent que l'adhésion de la mousse au béton a été endommagée : la rupture a lieu par décollement partiel de la mousse à 6 kPa de résistance et 6% de déformation (Tableau 4.7).

4.4.4 Synthèse des essais cycliques

Les essais cycliques de compression-décompression ont principalement montré la différence importante de comportement entre les résines semi-rigides hydrophobes et la résine hydrophile lorsque la fissure est soumise à des cycles de fermeture et d'ouverture.

La mousse hydrophobe semi-rigide a un comportement amortissant lors d'un cycle de compression-décompression : un effort de traction se développe pendant la décompression et il faut un certain temps à la mousse pour reprendre sa forme initiale. Au contraire, la mousse hydrophile est élastique.

Lors de l'essai de compression-décompression, les 30 cycles ont pour effet de diminuer fortement l'adhésion de la mousse hydrophobe semi-rigide au béton qui était déjà très faible. Par contre, l'essai cyclique en compression-décompression n'affecte pas l'adhésion de la mousse hydrophile au béton, sauf dans le cas où des cycles de compression-traction sont appliqués à la mousse.

En pratique, cependant, la déformation due au gel-dégel se développe très lentement, beaucoup plus lentement qu'avec la fréquence choisie au laboratoire (30 cycles en 45 minutes). L'essai de laboratoire sous-estime donc la résistance de la mousse, particulièrement celle de la mousse semi-rigide.

4.5. Synthèse des essais de laboratoire

Quatre types de résines polyuréthannes ont été testés au cours de la partie expérimentale de ce projet, et ce en vue de la sélection du produit d'injection le plus performant pour des applications sur chantier. Ces quatre résines polyuréthannes étaient représentatives des résines d'injection

couramment utilisées dans l'étanchéité de structures en béton. De ces essais, nous retirons les principales caractéristiques des différents types de résines.

Les résines hydrophobes semi-rigides ont une réaction très rapide, une expansion très importante et une viscosité très basse (100 cPs). La mousse obtenue possède une certaine adhésion au béton humide et une bonne déformabilité sous cycles d'ouverture et de fermeture de fissure.

Les résines hydrophobes flexibles ont une réaction moins rapide, une expansion moins importante et une viscosité relativement élevée (600 cPs) par rapport aux résines semi-rigides, mais restent satisfaisantes. De plus, la mousse obtenue est très déformable. En revanche, elle n'adhère pas du tout au béton humide.

Les résines hydrophiles ont une réaction moins rapide, une expansion plus faible et une viscosité relativement élevée (500 cPs) par rapport aux résines semi-rigides. La mousse obtenue est très déformable et possède une bonne adhésion au béton humide. En revanche, lorsque la mousse sèche, un retrait volumétrique important de la mousse se produit. C'est pourquoi la mousse hydrophile est généralement utilisée dans les milieux constamment saturés en eau, tels que les conduites d'eau souterraines, les réseaux d'égout, les piscines, les réservoirs d'eau ou les ouvrages hydroélectriques.

Ces essais de laboratoire ont ainsi montré que la mousse hydrophobe semi-rigide était la plus performante pour l'application en chantier. La partie suivante présente deux projets principaux qui ont eu lieu dans le cadre de ce projet de recherche et qui ont permis l'application du type de résine sélectionnée.

CHAPITRE 5 : PRÉSENTATION DE DEUX CAS D'APPLICATION

Le pont-tunnel Louis-Hippolyte-Lafontaine et le tunnel Ville-Marie

Ce chapitre présente les travaux de chantier qui se sont déroulés pendant ce projet de recherche. Ces travaux consistaient à traiter les problèmes d'infiltration d'eau par injection de polyuréthane dans deux tunnels. Ces deux ouvrages sont situés à Montréal et font partie de l'autoroute transcanadienne. Le tunnel Ville-Marie est situé au centre-ville et représente la section souterraine de l'autoroute 720. Il a fait l'objet de travaux d'injection à l'automne 1997 et au printemps 1999. Le pont-tunnel Louis-H.-Lafontaine relie l'île de Montréal à la Rive Sud, à la hauteur de Boucherville. Les travaux d'injection dans ce tunnel ont eu lieu à l'hiver 1998 et au printemps 1999.

5.1 Pont-tunnel Louis-H.-Lafontaine

5.1.1 Présentation de l'ouvrage

Le pont-tunnel Louis-H.-Lafontaine (Annexe D) a été construit entre 1963 et 1967 pour relier avec une voie de communication supplémentaire l'île de Montréal à la Rive Sud du Fleuve Saint-Laurent. Comme son nom l'indique, c'est un ouvrage mixte puisqu'il franchit en tunnel la voie maritime du Saint-Laurent et qu'il enjambe par un pont le bras sud du fleuve. Maillon important de l'autoroute 20, 110 000 véhicules empruntent le tunnel quotidiennement.

D'une longueur de 1500 m, la structure du tunnel repose sur le fond du Fleuve St-Laurent. Il se compose de neuf éléments, dont sept ont été préfabriqués et assemblés sous l'eau. Il est formé de deux tubes de circulation (nord et sud) comprenant chacun trois voies carrossables, d'un couloir de service central utilisé également comme couloir de ventilation et de deux tours de ventilation (nord et sud).

5.1.2 Problématique et objectifs des travaux d'injection

Les différentes inspections du pont-tunnel ont montré que les infiltrations d'eau se produisent à plusieurs niveaux :

1. Par les joints situés entre les éléments 6 et 7 et 7 et 8 . En effet, un décalage de la section 7 s'est produit lors de la construction (Fig. 5.1). Depuis, les joints 6/7 et 7/8 présentent des problèmes d'infiltrations, bien qu'ils aient été colmatés sous l'eau après la submersion des éléments de béton.
2. Dans les tours de ventilation nord et sud, des infiltrations se produisent aussi régulièrement au niveau de joints froids horizontaux (Fig. 5.2).
3. Dans la partie sud du tunnel (section 0, cf. plans en annexe D), plusieurs joints de construction posent aussi des problèmes d'étanchéité : le plus souvent, l'eau suinte par les deux fissures délimitant le contact entre le béton de remplissage du joint et les section de béton. Ces joints sont espacés de 15 mètres et ont été imperméabilisés de l'extérieur avec une membrane de polyvinyle [LAVOIE, 1968] et du bitume, et par endroit des plaques métalliques.
4. Toujours dans la partie Sud du tunnel, de fines fissures se sont également développées au plafond dans cette même partie sud du tunnel et à proximité du premier élément préfabriqué (élément 1).

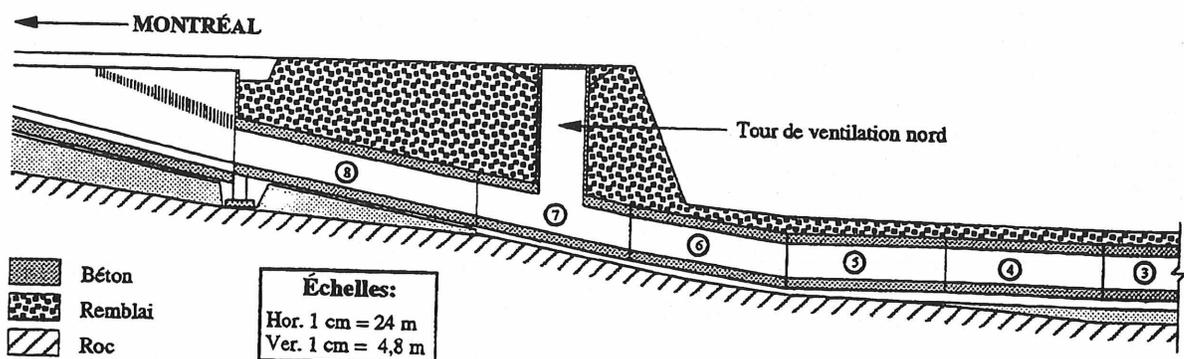


Figure 5.1 Emplacement des joint 6/7 et 7/8 ainsi que de la tour de ventilation Nord

Pour compléter l'inspection visuelle, une instrumentation (fissuromètres, thermocouples et pompe) a été installée en 1996 dans la tour de ventilation nord pour suivre les mouvements des

joints et des fissures concernés par l'écoulement et également les températures. La pompe était munie d'un dispositif permettant de mesurer le débit pompé. Les fissuromètres et les thermocouples étaient reliés à un acquiesiteur de données CR-10 (Fig. 5.2). Celui-ci étant équipé d'un modem, avec une simple ligne téléphonique il était possible d'enregistrer périodiquement les mesures sur un ordinateur à l'Université de Sherbrooke.

Cette instrumentation a confirmé que les venues d'eau sont principalement associées aux périodes de gel qui conduisent à l'ouverture des joints et des fissures.

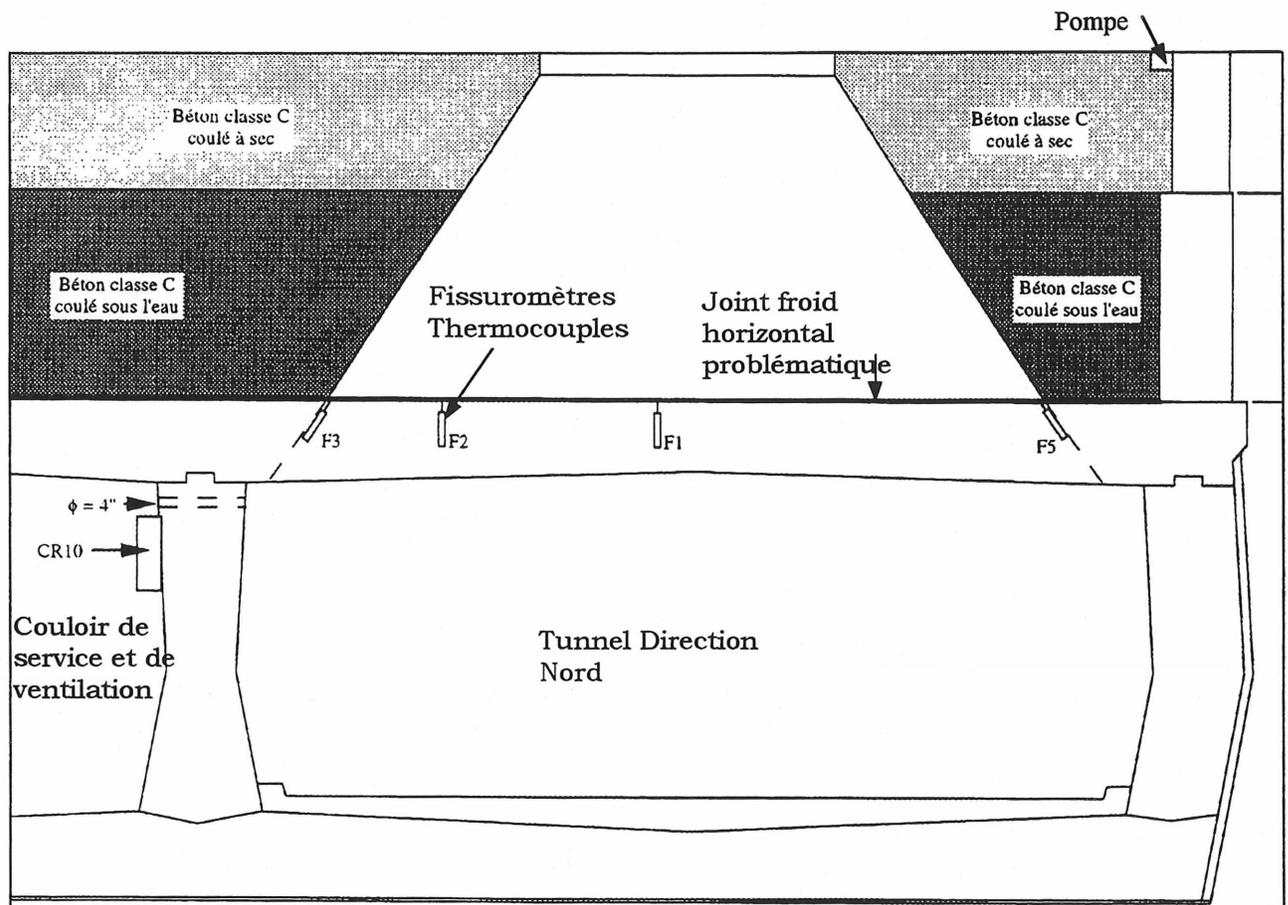


Figure 5.2 Vue en coupe de la tour de ventilation nord (direction nord) et localisation de l'instrumentation

L'objectif principal des travaux d'injection était donc de rendre étanche le tunnel au niveau des voies de circulation. Étant donnée la configuration du tunnel, il était possible de détourner les infiltrations d'eau dans la galerie de ventilation centrale où un dispositif de drainage et de pompage permet de les évacuer.

5.1.3 Présentation des travaux d'injection

Trois campagnes d'injection ont eu lieu de 1996 à 1999 dans le pont-tunnel (Tableau 5.1). Étant donné le nombre important de venues d'eau à traiter, les zones de traitement se sont déplacées d'une campagne à l'autre. La reprise de l'injection d'une année à l'autre a été nécessaire également dans certains secteurs plus problématiques, notamment à la tour de ventilation nord .

TABLEAU 5.1 CAMPAGNES D'INJECTION RÉALISÉES AU PONT-TUNNEL L.-H.-LAFONTAINE DE 1996 À 1999

Date	Localisation	Résines utilisés	Quantités	
			Long. (m)	coulis (l)
Juin à novembre 1996	Joint de la tour de ventilation nord Joints 6/7 et 7/8 Fissures mineures (section sud) Joints de construction (section sud)	Flexible F1000	570	705
Février à mars 1998	Tour de ventilation nord (coulis de ciment et coulis chimique) Tour de ventilation sud Joint 6/7 et 7/8 Fissures mineures (section sud) Joints de construction (section sud)	Semi-rigide H100	760	1230
Avril à mai 1999	Tour de ventilation nord Fissures mineures (section sud) Joints de construction (section sud)	Semi-rigides H 100 PF 930 JTHANE	382	1110

Pour connaître le détail des travaux réalisés pendant chacune des campagnes, on se référera aux rapports correspondants (cf. Annexe E). La section suivante présente un exemple : le déroulement de l'injection d'un joint problématique dans la tour de ventilation nord.

5.1.4 Cas de l'injection dans un joint de la tour de ventilation nord (campagnes de 1998 et 1999)

a) Problématique

Des forages de reconnaissance effectués en 1997, dans la tour de ventilation nord, ont montré que le béton coulé sous l'eau était très désagrégé. A l'époque, en effet, on utilisait pas d'agent anti-lessivage dans les bétons coulés sous l'eau.

En 1998, des travaux d'injection au coulis de ciment ont donc été réalisés pour restaurer l'intégrité de ce béton. Au début de 1999, soit un an après ces travaux, une nette amélioration de l'étanchéité au niveau des voies de circulation et des salles de service de la tour de ventilation nord a été constatée. En effet, les venues d'eau ne se produisent plus par les cheminées des ventilateurs, sauf par le joint froid horizontal situé dans le béton coulé sous l'eau et la voûte de la section 7, où l'eau a été repoussée. La répartition du coulis de ciment a probablement aussi été très inégale dans la tour nord. En effet une inspection montre que les venues d'eau proviennent principalement de trois des ventilateurs d'évacuation d'air vicié VE 153, VE 152 et VE 154. (Fig. 5.2). L'autre ventilateur VE 151, qui est resté totalement sec pendant cette période, a quant à lui été effectivement colmaté à tous les niveaux. Pour compléter l'étanchéité de la tour de ventilation, une nouvelle campagne d'injection, au coulis chimique cette fois, a donc eu lieu pendant l'hiver 1999 pour colmater le joint horizontal. La présente section indique les produits, la technique utilisée et décrit le déroulement des travaux.

b) Produits utilisés

A la suite des essais de laboratoire trois produits ont été jugés conformes au devis. Les trois produits étaient les plus performants pour résister aux conditions sévères imposées à la structure pendant les périodes de gel-dégel. Les trois produits sont des résines prépolymères hydrophobes semi-rigides : H 100, de Multiurethanes, PF 930 de Ambex et JTHANE de Krytex. Pour l'injection de la tour de ventilation nord, seule les deux premières ont été utilisées.

c) Méthode utilisée

Les travaux d'injection ont été réalisés selon les spécifications décrites dans le devis élaboré par le Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée de l'Université de Sherbrooke et selon la technique exposée à la section 2.5.

Un filet de protection gênant l'accès par le dessus du joint, les forages d'injection ont été effectués à partir du bas du joint horizontal seulement. L'espacement des forages a été fixé à 25 cm (10") et l'intersection avec le joint s'effectuait à environ 40 cm (15") de profondeur (Fig. 5.3).

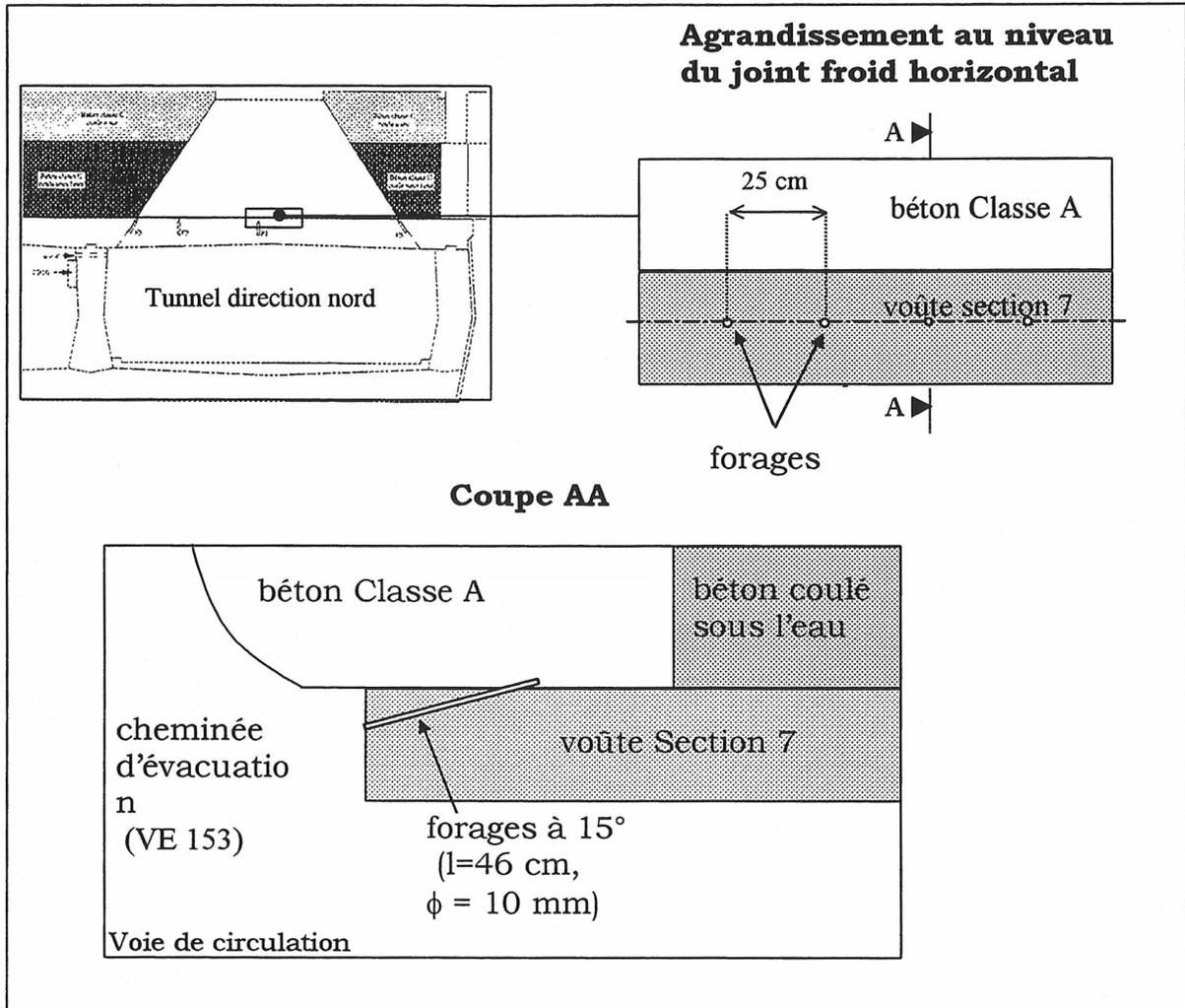


Figure 5.3 Localisation des forages d'injection au coulis chimique

Le joint a été nettoyé sous pression à l'acide phosphorique et à l'eau afin de dégager le joint de toute particule pouvant gêner la propagation de la résine et empêcher une bonne adhérence du coulis au béton. L'observation de la quantité d'eau absorbée par le joint et le temps mis par l'eau pour revenir à la surface a permis d'évaluer l'absorption future du coulis et également d'ajuster son temps de réaction. Des bacs chauffants permettaient aussi de maintenir le coulis à une température supérieure à 20 °C afin d'avoir un temps de réaction rapide et une viscosité basse. Le coulis a été injecté successivement dans tous les manchons mis en place le long du joint. L'injection s'est déroulée en deux passes espacées d'environ 15 minutes. Généralement, la première passe s'effectuait avec une pression de 4 à 6 MPa (600 à 800 psi) et la deuxième à une pression 7 MPa (1000 psi). Enfin, le colmatage du joint n'a pas été nécessaire parce que la perte

de résine en surface n'était pas très importante. Il était alors possible d'observer le retour du coulis en surface.

d) Déroulement de l'injection

La figure 5.4 montre les quantités injectées et la répartition du coulis dans la structure. Pour les trois ventilateurs, l'injection des côtés sud et nord du joint a montré une absorption très faible du coulis (<1 litre /m), étant donné que plusieurs travaux d'injection avaient déjà eu lieu par le passé. Deux points d'injection ont absorbé 75 % de la quantité totale utilisée : le coin sud-est du ventilateur VE 153 et le coin nord-ouest du VE 152. Au VE 153, en direction nord, le colmatage a été principalement assuré en injectant par le coin sud-est. Pendant le forage des trous d'injection dans ce coin, on avait déjà rencontré une infiltration d'eau importante. Le temps de retour de l'eau lors de l'essai d'eau et de la résine pendant l'injection étant très long, le pourcentage d'accélérateur a été fixé à 5% puis 3%, pour permettre au coulis de se déplacer le plus loin possible. La pression d'injection dans ce coin est passée progressivement de 500 à 1000 psi : au total, 136 litres de coulis ont été injectés à l'aide de deux pompes montées simultanément. Elle a été poursuivie jusqu'à ce que l'eau soit repoussée le plus loin possible sur les côtés sud et est du joint. A la fin de l'injection, on observe que le coulis a voyagé sur une longueur de 3 m de chaque côté du point d'injection, l'eau étant repoussée dans la voie de gauche (Photo 5.1).

La phase d'injection dans la voie de gauche, c'est-à-dire la voie qui jouxte la galerie centrale de ventilation a montré une plus faible absorption (27 litres). Le coulis a voyagé très loin en longeant la lame d'étanchéité, puisque de l'eau a été repoussée dans le VE 151, à plus de 10 m du point d'injection .

Au ventilateur VE 152 dans la direction sud, le colmatage du joint a été principalement assuré en injectant par le coin nord ouest., l'eau étant sans cesse repoussée de plus en plus loin sur les côtés nord et ouest (Fig. 5.4).

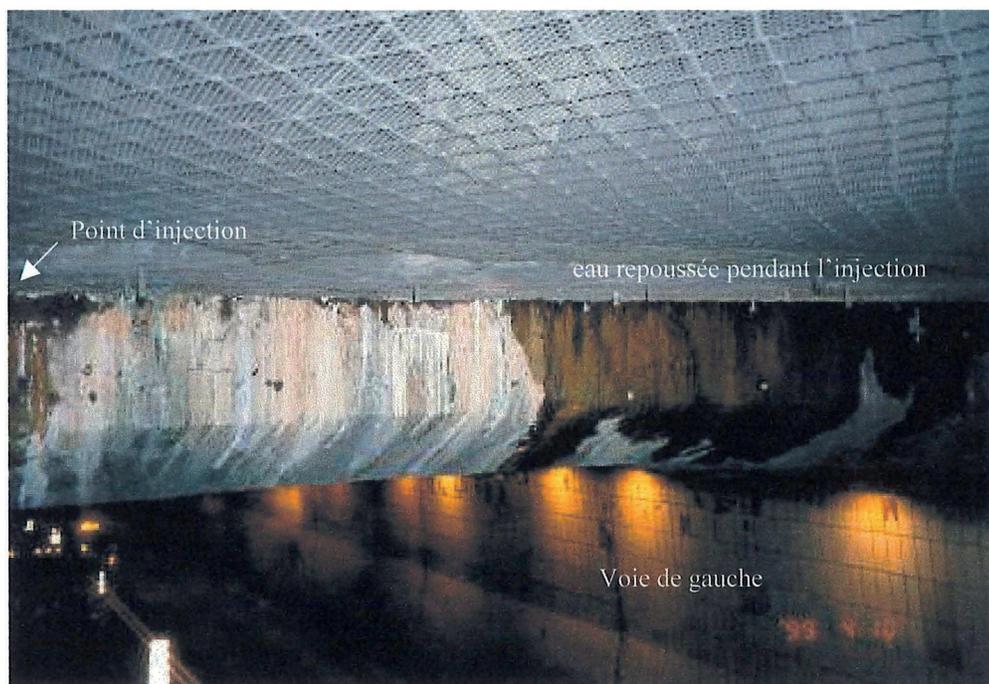


Photo 5.1 Vue du joint sud du ventilateur VE153, juste après l'injection à partir du coin SE

e) Quantités

Au total, 325 litres ont été injectés pour les ventilateurs VE 152 et 154, en direction sud et 186 litres pour le VE 153, en direction nord, soit un total de 511 litres de coulis pour 66 m de préparation (Tableau 5.2). L'absorption (7,7 l/m) était donc très élevée, ce qui montre qu'il existait encore un important vide au niveau de ce joint.

TABLEAU 5.2 QUANTITÉ DE COULIS UTILISÉE POUR L'INJECTION DE LA TOUR DE VENTILATION NORD

Direction et Voie	N° Ventilateur	Coulis	Quantités		
			Longueur (m)	Coulis (l)	Absorption (l/m)
Dir. nord voie de droite	VE 153	H100	11	159 (136 coin SE)	14,5
Dir. nord voie de gauche	VE 153	H100	11	27	2,4
Dir. sud voie de droite	VE 152	PF 930	4	240 (236 coin NO)	13,0
	VE 152 et VE 154	H100	18	45	
Dir. sud voie de gauche	VE 152 et VE 154	PF 930	22	40	1,8
Total :			66	511	7,7

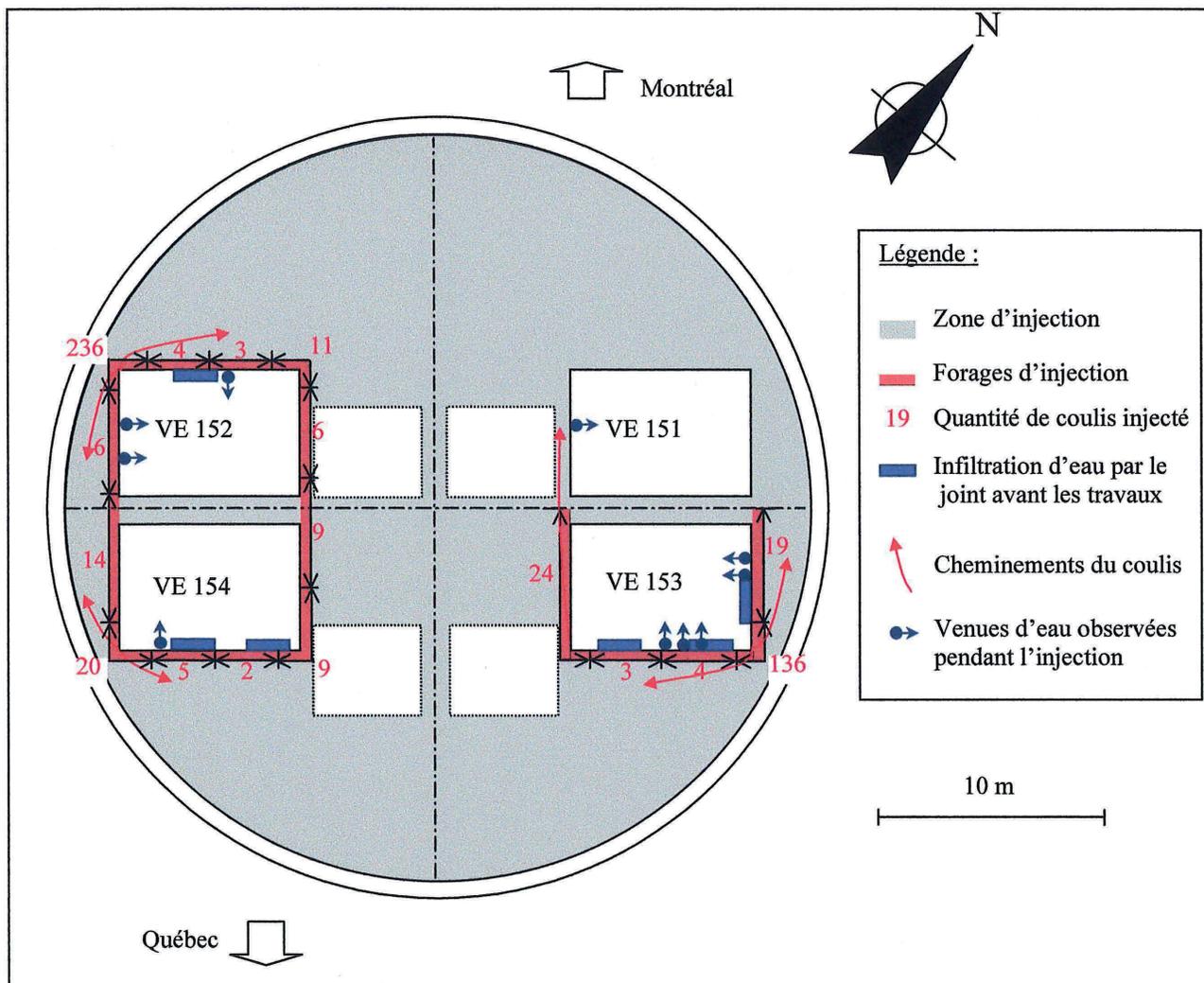


Figure 5.4 Répartition du coulis chimique dans la tour de ventilation nord (vue de dessus)

Il faut noter que 75% de la quantité de coulis, soit 372 litres a été injecté dans les deux coins sud-est et nord-ouest des VE 152 et 153. Le reste du joint a montré une absorption plus faible et conforme aux prévisions, soit 2 l/m en direction sud (89 litres sur 44 m) et 2,3 l/m en direction nord (50 litres sur 22 m).

5.1.5 Résultat des travaux d'injection

L'injection du joint situé dans la tour de ventilation nord a permis de colmater les dernières venues d'eau qui s'écoulaient dans les voies de circulation. Le joint était parfaitement sec deux semaines après les travaux. En ce qui concerne le colmatage des joints de construction et des

fissures mineures au plafond, des résultats ont également été visibles immédiatement après l'injection. Tel que prévu, l'eau a été repoussée hors des voies de circulation principalement vers les galeries de ventilation et de service situées dans la partie centrale. Cependant, étant donné le nombre important de fissures repérées et la délamination du béton, principalement dans la partie sud du tunnel, on peut raisonnablement s'attendre à ce que d'autres fissures coulent dans d'autres secteurs dans les prochaines années.

Les travaux sont encore trop récents pour savoir si le traitement est efficace à long terme. La plupart des venues d'eau qui ont été traitées par injection de polyuréthane ont cependant été stoppées.

5.2 Tunnel Ville-Marie

5.2.1 Présentation de l'ouvrage

Le tunnel Ville-Marie représente la section souterraine de l'autoroute Ville-Marie, un maillon important de l'autoroute transcanadienne. Il traverse le centre-ville de Montréal, principalement sous les rues St-Antoine, St-Jacques et Viger (Annexe D). Au total, l'ouvrage se compose de 6 km de tunnels comprenant 1,8 km pour la voie A (direction ouest), 1,8 km pour la voie B (direction est) et 2,4 km pour les voies d'accès (voies C, D, E, F, K et L). Il a été construit entre les années 1971 et 1974. Des tunnels de secours et de service longent tous les tunnels et cinq tours de ventilation (numérotées 9 à 13) assurent l'alimentation en air frais et l'évacuation de l'air vicié sur toute la longueur de l'ouvrage.

Le tunnel a été construit en tranchée ouverte, en construisant des parois moulées dans les terrains superficiels et en excavant une partie du rocher. Chacun des deux tubes principaux A et B mesure intérieurement 13 m de large et 5,5 m de hauteur et possède trois voies de circulation (Fig. 5.5). Les tunnels sont faits de sections de béton d'environ 12 m de largeur espacées par des joints de dilatation en *styrofoam* et recouvertes extérieurement par un enduit bitumineux.

La direction ouest (A) est située principalement sur la direction est (B), mais les deux voies se décalent progressivement aux deux sorties ouest et est pour devenir l'une à côté de l'autre.

5.2.2 Problématique

Au début de l'année 1997, le Ministère des Transports du Québec entreprend la réfection du tunnel Ville-Marie et demande au Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée de suggérer un traitement contre les infiltrations d'eau du tunnel. En effet, depuis la construction de l'ouvrage, le personnel d'entretien doit faire face à un problème de venues d'eau grandissant. Le Laboratoire a successivement entrepris des inspections de l'ouvrage et des travaux d'injection et d'instrumentation.

Les premières inspections ont montré que c'est principalement par les points de faiblesse de l'ouvrage, soit les galeries de service, les cages d'escalier, les tours et les galeries de ventilation que la plupart des venues d'eau s'infiltrent. L'eau peut alors s'écouler dans les voies de circulation par les joints de dilatation, et principalement dans le tube B, qui est celui où le problème des venues d'eau est le plus important car il est situé dans la partie inférieure de l'ouvrage. La complexité de l'ouvrage et le nombre important de galeries de service et de tunnels superposés rend le traitement difficile. Dans ce cas, il est important de bien localiser l'origine des venues d'eau

Depuis la fin de l'année 1997, un nouveau type d'infiltration plus problématique a pu être observé. Sur un secteur d'une longueur de 200 m, de l'eau provient du pavage de la voie B en causant soit des gonflements, soit des zones humides, tous les deux très dangereux pour la circulation. Pour mieux étudier ce phénomène, le secteur a été instrumenté à l'aide de piézomètres et d'un débitmètre sous la voie B (Fig. 5.5). Cette instrumentation a montré que l'eau provient en fait du granulaire situé sous le radier de béton. Sous une forte pression (100 kPa) et avec le temps, l'eau a fini par traverser le béton (1,2 m d'épaisseur) et à s'infiltrer dans les voies. Pendant le forage, et avant la pose des piézomètres, une venue d'eau importante s'est produite (Photo 5.2). D'après la hauteur du jet, le débit était alors estimé entre 5 et 10 litres /seconde !.

Des analyses de l'eau ont également été réalisées sur plusieurs échantillons provenant des eaux d'infiltration. Ces analyses montrent un pourcentage important de chlorure dans l'eau. Il est donc possible qu'une partie des eaux ruissellement, c'est-à-dire celle contenant des sels de déglace, ne soit pas correctement drainée par le réseau d'assainissement de la ville et qu'elle finit par s'infiltrer dans la structure.

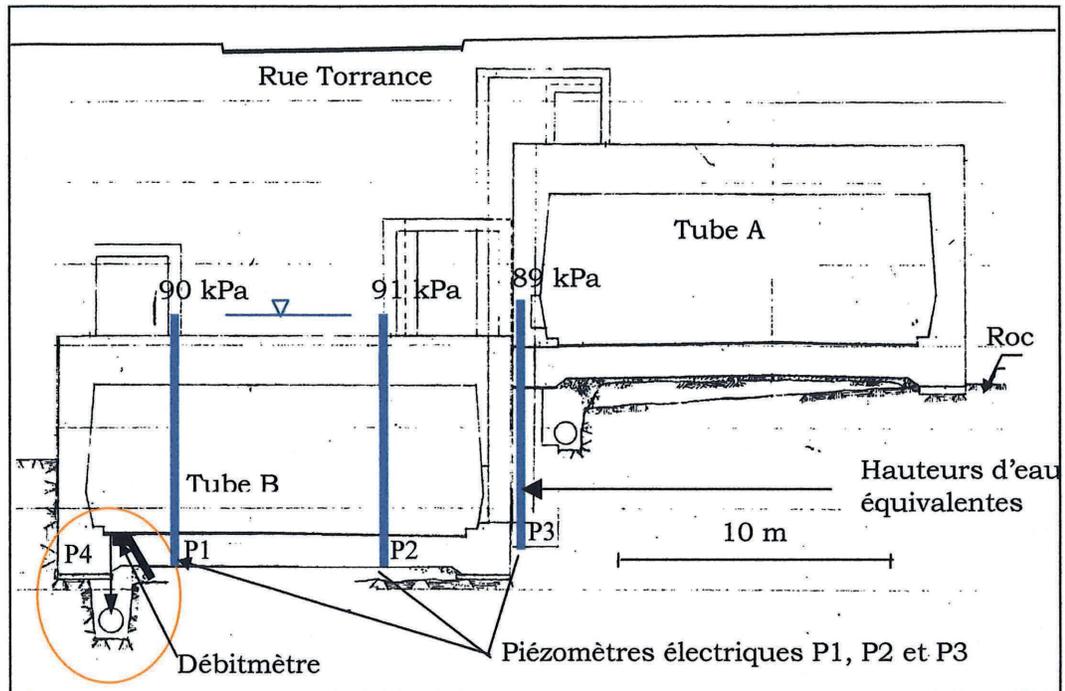
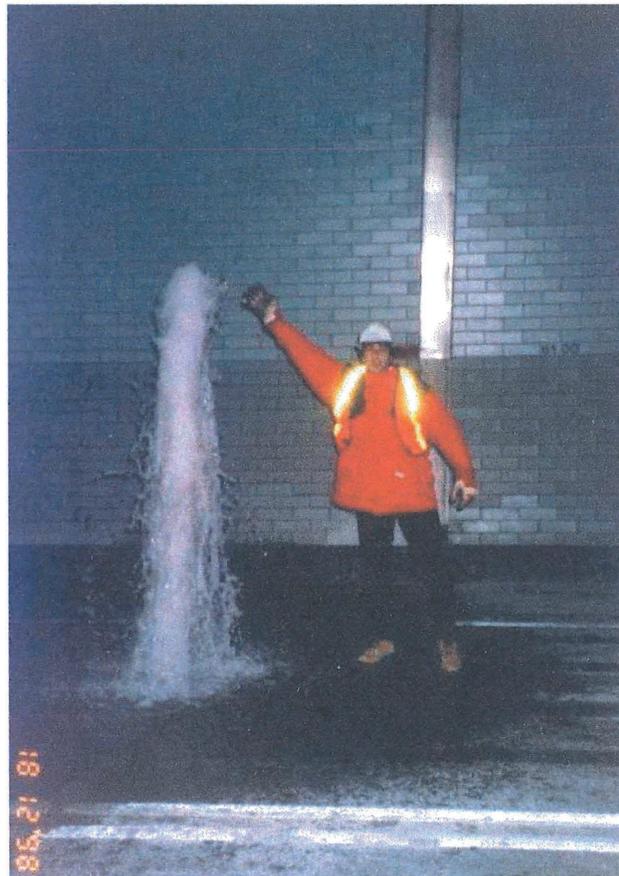


Figure 5.5 Instrumentation posée au tunnel Ville-Marie et pressions d'eau mesurées au 18-12 1998, juste après la pose des piézomètres.

Photo 5.2 Venue d'eau lors du forage (P1) dans le radier de la voie B



Plusieurs infiltrations majeures provenant directement du terrain encaissant ont également été repérées : dans la tour 11, un carottage vertical effectué à partir d'une cheminée de ventilation au travers de la dalle de béton a rencontré une nappe d'eau artésienne. Le forage coule en permanence et un puits de captage a dû y être percé en juin 1999. Dans la tour 9, plusieurs forages horizontaux (0,3 m de profondeur) ont dû être percés au mur du couloir de secours de la voie B et dans une galerie de ventilation. La plupart des forages coulent à certaines périodes de l'année. Enfin, dans une galerie de service de la voie F, un forage coule abondamment et en permanence au mur.

Suite à ces observations et à l'instrumentation, les archives de la construction du tunnel et les conditions géologiques entourant l'ouvrage ont été étudiées pour mieux comprendre l'origine de ces infiltrations d'eau .

S ← Fleuve St-Laurent

Mont-Royal → N

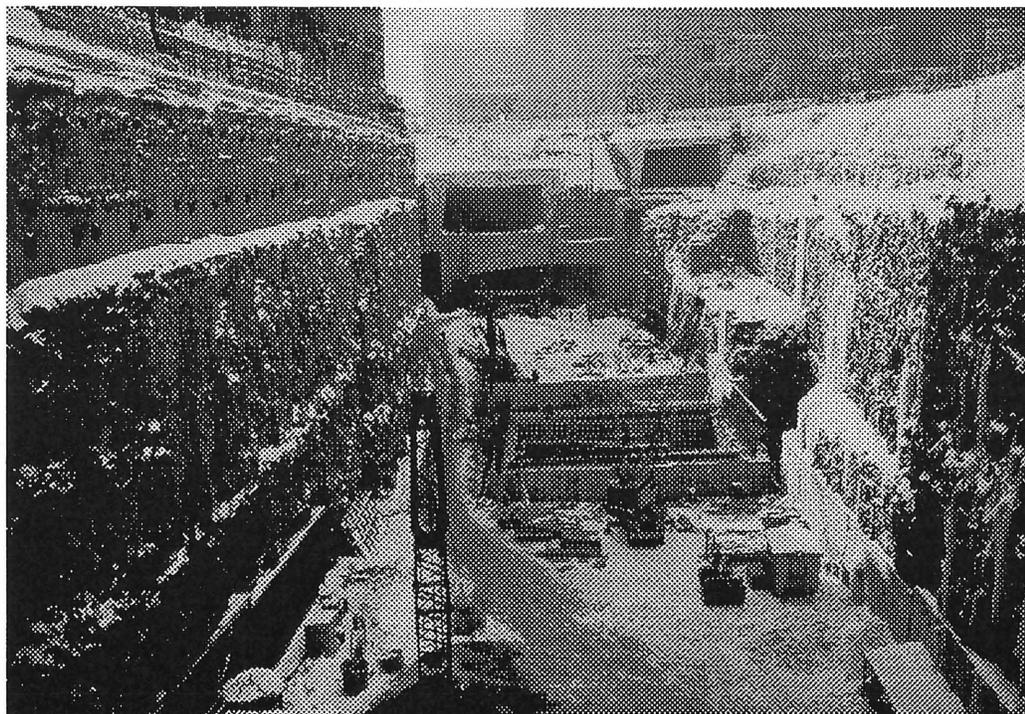


Photo 5.3 Vue du tunnel lors de la construction (Scé : *Archives du tunnel*, 1970)

A l'époque où le tunnel a été construit, dans les années 70, les conditions hydrogéologiques de l'île étaient mal connues.

Tel que montré par la photo 5.3, avec la formation de glace, pendant l'hiver, l'écoulement d'eau provient du nord (Mont-Royal), l'eau s'infiltrant entre les lits de calcaire. Aussi, lors de l'excavation, des venues d'eau ont été constatées, mais la mise en place d'un système de pompage pendant le coffrage a été suffisant pour résoudre le problème.

Dans un chapitre consacré à l'ensemble des problèmes de géologie appliquée à prévoir sur l'île de Montréal, GRICE [1972] explique qu'il sera nécessaire de connaître avec beaucoup plus de précision les conditions de pression et d'écoulement de l'eau. Il constate que même si lors des excavations dans la mince couche de sol, les venues d'eau sont faibles pendant la saison sèche, il est possible d'avoir des infiltrations importantes pendant les autres saisons. Ainsi, à l'époque de la construction, les systèmes de drainage n'ont pas toujours été conçus de manière satisfaisante pour parer à ces problèmes.

GRICE prend d'ailleurs pour exemple la construction de l'autoroute transcanadienne en expliquant que dans les excavations situées à moins de 10 m au-dessus du niveau du fleuve, comme c'est le cas pour le tunnel Ville-Marie, il est possible que les venues d'eau se produisent également à partir du fleuve. Les concepteurs ont compté sur l'étanchéité parfaite de la structure pour éviter les problèmes d'infiltration d'eau dans l'ouvrage. De ce fait, aucun système de drainage n'a été conçu pour le tunnel Ville-Marie. Des parois moulées ont été construites jusqu'au rocher, « cette solution étant loin d'être idéal » selon GRICE [1972].

Au cours de ces dernières années, l'eau s'est ainsi accumulée autour de la structure, des pressions d'eau se sont créées et l'eau a fini par s'infiltrer à travers le béton dans les zones les plus faibles (joints, défauts de construction...). Ce phénomène explique non seulement les problèmes de venues d'eau sous l'enrobé de la voie B et les soulèvements de l'asphalte, mais est aussi à l'origine des autres venues d'eau du tunnel, par les joints et dans les escaliers et couloirs de service. Pour résoudre ces problèmes, le meilleur moyen serait de dissiper ces sous-pressions par un drainage et un pompage adéquats. Cependant, dans les zones où le béton est plus dégradé

et où les venues d'eau sont les plus nombreuses, il faut également réaliser des travaux d'injection pour restaurer l'étanchéité du béton, surtout au niveau des joints de dilatation des escaliers de service.

5.2.3 Présentation des travaux d'injection

Suite à la première inspection du tunnel au début de l'année 1997, un devis d'injection a été rédigé et des travaux ont été réalisés à l'automne 1997. Les travaux ont été réalisés suivant un devis descriptif, c'est-à-dire un devis décrivant, entre autres, les types de produits à employer et la méthodologie préconisée. Ce devis, rédigé par le Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, contenait en particulier des critères de sélection que la résine d'injection devait remplir pour être satisfaisante (Tableau 5.3)

C'était donc à l'entrepreneur de choisir le coulis d'injection et de s'assurer qu'il remplissait bien toutes les spécifications du devis. Le coulis d'injection devait être approuvé par le ministère des Transports du Québec avant les travaux.

TABLEAU 5.3 EXIGENCES POUR LE PRODUIT D'INJECTION SPÉCIFIÉES DANS LE DEVIS

Caractéristiques	Sans solvant, non toxique, faible porosité lorsque confiné, hydrophobe de préférence, flexible ou semi-flexible et structure alvéolaire serrée
Viscosité	200 ± 100 cPs
Vitesse de réaction	Réaction complète à 90% en moins de 10 minutes
Retrait	Aucun (pendant et après la réaction)
Étanchéité	Sans fuite sous une pression d'eau de 300 kPa
Adhérence	Bonne aux surfaces humides (résistance en traction > 10 kPa)
Déformabilité	> 10% en traction sans provoquer de décohésion
Stabilité	Bonne aux cycles gel-dégel, aux cycles mouillage-séchage et lors de cycles de déplacement Intégrité sous ouverture et fermeture de la fissure

Ces travaux s'inscrivaient dans un projet de réfection global du tunnel Ville-Marie et regroupaient essentiellement l'injection de plusieurs joints situés dans les voies B, C et D et dans la tour 13. Le coulis utilisé était la résine hydrophobe semi-rigide H100 pour tout le tunnel. Les quantités utilisées sont indiquées dans le tableau 5.4.

Une deuxième campagne d'injection a été prévue pendant l'hiver 1999 dans les galeries de service et les tours de ventilation 9, 10, 11 et 12. Cependant, il sera nécessaire de poursuivre les travaux dans les prochaines années, puisque 15 % seulement des travaux prévus ont été complétés pendant cette phase. Le coulis utilisé était les résines hydrophobes semi-rigides H100 Jthane et PF 930.

TABLEAU 5.4 CAMPAGNES D'INJECTION RÉALISÉES AU TUNNEL VILLE-MARIE (1997 et 1999)- estimations entre parenthèses.

Date et localisation des travaux	Produits utilisés	Préparation (m)	Coulis (l)	Absorption (l/m)
Travaux automne 1997 Voie B, C et D Et Tour 13	Semi-rigide H100	496 (570)	1786 (1360)	3,6 (2,4)
Travaux Hiver 1999 Tour 9	Semi-rigide H 100 PF 930 Jthane	107 (100)	306 (300)	2,9 (3)
Total		603 (670)	2092 (1660)	3,5 (2,5)

5.2.4 Résultat des travaux d'injection

Suite à la première campagne, une inspection a été réalisée en avril 1998 pour évaluer l'efficacité des travaux et estimer les travaux à venir. Cette inspection a révélé que les travaux ont amélioré de façon importante l'étanchéité de l'ouvrage au niveau des voies de circulation et des galeries de service. Ainsi, les venues d'eau qui s'écoulaient par la tour 13 ont été colmatées à 80 %. De plus, après les travaux, d'autres venues d'eau sont apparues à des endroits qui étaient secs auparavant. Cela montre que l'eau a été stoppée aux endroits injectés et repoussée vers d'autres secteurs.

Depuis ces travaux, de nouvelles investigations ont montré que les travaux d'injection seuls ne permettent pas de traiter tout le problème des infiltrations dans le tunnel Ville-Marie. Il faut plutôt envisager la combinaison du drainage et de l'injection ; le drainage permettant de diminuer les pressions d'eau et le rideau d'injection empêchant le passage de l'eau et ralentissant la dégradation du béton.

Pendant toutes les campagnes d'injection, les produits sélectionnés, soit les résines semi-rigides H100, PF 930 et Jthane ont montré un très bon comportement pendant l'injection et quelques

mois après les travaux. Aussi, le suivi dans le temps de l'étanchéité des joints et des fissures injectés permettra d'avoir des renseignements importants sur la stabilité à long terme de la mousse polyuréthane. Le comportement à long terme est, pour le moment, difficile à évaluer parce que leur application est encore récente. L'injection montre déjà dans l'ensemble de très bons résultats après une année. Pour la dernière campagne de 1999, le fait d'avoir utilisé trois résines d'injection différentes permettra aussi de comparer leur comportement respectif. Alors qu'au Québec, les cas d'injection au polyuréthane de tunnels routiers sont encore assez rares, ces résultats pourraient être importants pour les cas d'applications futures.

5.3. Synthèse et parallèle avec les résultats de laboratoire

Dans les travaux d'injection réalisés au tunnel Ville-Marie et au Pont tunnel Louis-Hippolyte Lafontaine, les produits d'injection sélectionnés après les essais de laboratoire, des produits de type hydrophobe semi-rigide, ont montré un très bon comportement pendant l'injection.

Le temps de réaction de la résine avec l'eau a pu être ajusté en fonction des besoins du chantier. Chauffé, le produit a convenablement réagi; même lorsque la température extérieure atteignait les -30°C. Le fait que le produit soit moussant et expansif pendant sa réaction était un atout important de la réussite de l'injection, le remplissage des fissures étant parfaitement bien réalisé.

Comme dans les essais de laboratoire, un certain confinement de la mousse était réalisé pendant l'injection sous pression de la résine. Les échantillons de mousse récupérés en surface présentaient une structure similaire à ceux récupérés sur les échantillons de laboratoire : une structure à bulles très fines, beaucoup plus fines que pour les échantillons obtenus en expansion libre, sans confinement. Mis à part le facteur d'échelle, l'échantillon de laboratoire semble donc s'approcher assez bien du rideau d'injection obtenu en chantier. Il serait également intéressant de réaliser des carottages dans les zones injectées pour avoir plus d'informations.

Un an après les travaux, l'étanchéité est stable dans les secteurs injectés. Cependant, du fait que ces travaux d'injection sont encore trop récents, il n'a pas été possible de vérifier le bon comportement à long terme de la mousse injectée.

CHAPITRE 6 : CONCLUSION

L'objectif principal de ce travail de recherche était de comparer différents types de résines d'injection de polyuréthanes en vue de sélectionner les plus performantes pour un projet de traitement d'infiltration d'eau dans un tunnel en service.

6.1 Partie expérimentale au laboratoire

Tout d'abord, la partie expérimentale a été déterminée de façon à simuler les conditions retrouvées potentiellement dans un ouvrage souterrain au Québec. Un montage expérimental a ainsi été développé pour tester le comportement mécanique de la mousse injectée dans une fissure. Il a ainsi été possible d'étudier la durabilité de l'injection du point de vue de l'action des mouvements saisonniers d'ouverture et de fermeture des fissures. A partir de ces essais de laboratoire, il était plus facile de comprendre le comportement des différents types de résines semi-rigides, flexibles, hydrophobes ou hydrophiles.

Les résultats obtenus à l'aide du montage expérimental ont montré que la mousse polyuréthane est un matériau difficile à tester en laboratoire, ce qui explique le fait qu'il n'existe pas d'essai normalisé permettant de sélectionner les produits les plus performants dans l'industrie. Le montage développé présentait l'avantage d'être simple et permettait de déterminer la résistance en traction et l'élongation à la rupture de la mousse injectée. Mais il présentait aussi l'inconvénient de ne pas tenir compte de tous les facteurs pouvant influencer la mousse. Il était difficile notamment de contrôler le confinement de la mousse et de reproduire des essais similaires d'un échantillon à l'autre.

L'injection des échantillons de béton fracturés artificiellement a montré d'importantes différences de comportement selon les résines. Nous avons pu vérifier que toutes les résines testées (hydrophobes semi-rigides, flexibles et hydrophiles) réagissent très bien au contact du béton humide, même à 5°C, et que la répartition du coulis dans la fissure est continue et bien

homogène. Par contre, la pression d'injection engendrée par l'expansion de la mousse varie beaucoup suivant les types de résines. Cette pression mesurée dépend en réalité des caractéristiques du montage, notamment du moule d'injection et des paramètres choisis, de la quantité de résine injectée et de l'ouverture de la fissure.

Les essais de traction ont mis en évidence le rôle important joué par plusieurs facteurs. Le mode de rupture varie suivant les conditions de la fissure. La rupture en traction se produit dans la mousse lorsque le béton est sec (rupture cohésive) alors que lorsque le béton est humide, elle se produit au contact mousse-béton (rupture adhésive). Aussi, l'adhésion au béton humide varie suivant le type de résine testée. La déformation à la rupture dépend à la fois du type de produit et, pour un même produit, de la pression de confinement après l'injection. Plus la pression est forte, plus la déformation à la rupture en traction est élevée.

Des essais de laboratoire, il est ainsi possible de retirer plusieurs caractéristiques suivant les différents types de résines :

- Du point de vue des caractéristiques de la résine avant et pendant la gélification (réaction de la résine avec l'eau pendant l'injection), les résines hydrophobes semi-rigides sont plus performantes que les résines hydrophiles et hydrophobes flexibles. Les résines semi-rigides ont une réaction plus rapide, une expansion très importante et une viscosité plus basse.
- En ce qui concerne les caractéristiques mécaniques de la résine après gélification (mousse injectée), la mousse obtenue dans le cas des résines semi-rigides est moins déformable que les résines hydrophiles et hydrophobes flexibles, comme on pouvait s'y attendre. En revanche, la mousse obtenue dans le cas des résines semi-rigides possède une certaine adhésion au béton humide, alors que celle obtenue dans le cas des résines flexibles n'adhère pas du tout au béton humide.
- Pour la stabilité de la mousse à long terme, deux mousses hydrophobes sont totalement inertes et ne subissent aucun retrait à long terme. En revanche, la mousse hydrophile est

susceptible de perdre l'eau qu'elle a absorbé pendant la réaction et un retrait volumétrique important de la mousse se produit. C'est pourquoi la mousse hydrophile est généralement utilisée plutôt dans les milieux constamment saturés en eau, tels que les conduites d'eau souterraines, les réseaux d'égout, les piscines, les réservoirs d'eau ou les ouvrages hydroélectriques, mais qu'on ne recommande pas de l'utiliser dans le cas où le milieu est susceptible de sécher, comme dans le cas des tunnels routiers revêtus, cas d'application qui concernent ce projet de recherche.

C'est pourquoi la résine de type monocomposante, hydrophobe et semi-rigide a été recommandée pour les travaux d'injection en chantier.

6.2 Application en chantier

Les travaux en chantier ont montré que la technique d'injection au polyuréthane est très efficace pour l'imperméabilisation de structures en béton. Cependant, l'objectif visé dépend de l'enjeu propre à chaque problème d'infiltration d'eau. Tant au tunnel Ville-Marie qu'au pont-tunnel Lafontaine, les venues d'eau sont diffuses et localisées un peu partout dans la structure. Dans ces cas, l'objectif du traitement était de réduire les infiltrations d'eau et principalement pour limiter la dégradation des équipements et les problèmes de gêne de la circulation. La technique a permis de réduire les venues d'eau à un niveau acceptable dans les deux cas, mais les zones à traiter sont nombreuses et le traitement devra être poursuivi dans les prochaines années.

Alors qu'au Québec, les cas d'injection au polyuréthane de tunnels routiers sont encore assez rares, la multiplication d'études de cas semblables à ceux étudiés au cours de ce projet et le suivi dans le temps de l'étanchéité des joints et des fissures injectés pourraient être importants pour des applications futures.

6.3 Recommandations

Pour continuer les recherches dans le domaine de l'injection des résines polyuréthanes utilisées pour le traitement des infiltrations d'eau dans les tunnels, il serait important de poursuivre les recherches sur plusieurs points, et notamment :

- Étudier au laboratoire l'influence de la pression développée par la réaction d'expansion de la mousse sur le comportement à long terme de la mousse injectée. La pression se maintient-elle dans une fissure après l'injection ? Et si tel est le cas, se maintient-elle longtemps après plusieurs cycles de gel-dégel ?
- Étudier l'influence de la pression d'injection sur la pression de confinement se maintenant dans la fissure après l'injection. Ces deux pressions sont-elles directement reliées ?
- Réaliser des carottages sur chantier dans les zones injectées afin de prélever des échantillons et pouvoir comparer le produit effectivement obtenu après l'injection avec celui obtenu au laboratoire.
- Mettre sur pied des séances de qualification pour les techniciens d'injection de polyuréthane. Les donneurs d'ouvrages pourraient alors être en mesure de mieux évaluer la qualité des techniciens d'injection et le savoir faire des entreprises d'injection avant chaque chantier, comme pour le cas des travaux au béton projeté par exemple.

Aussi, il serait intéressant de concevoir in-situ un plot d'essai instrumenté à l'aide de thermocouples, de fissuromètres et de capteurs de pression. Ce plot d'essai pourrait alors être injecté avec différents produits et permettre le suivi de l'étanchéité sur plusieurs années. De cette façon, le comportement de différents types de mousses polyuréthanes serait comparé dans les conditions retrouvées effectivement in-situ et dans des conditions similaires d'un produit à l'autre. Enfin, les paramètres tels que les variations de température, les mouvements de fissures, la pression d'injection et la pression de confinement seraient mieux maîtrisés.

BIBLIOGRAPHIE

- ABERDEEN GROUP (1998) *Avoiding polyurethane grouting pitfalls*, Concrete Construction, Vol. 43, n° 7, pp. 622-624
- AGUIAR, J.L.B. (Mars 1993) *Essais d'adhérence des époxydes au béton hydraulique*, Matériaux et Constructions, Commissions techniques Rilem, Vol. 26, N° 156, pp. 90-97
- ANDERSSON, H. (October 1995) *Grouting of rocks with chemical compounds-revue of litterature*, Rapport interne, Gotëborg (Suede), 61 p.
- ANDERSSON, H. (1998) *Chemical rock grouting an experimental study on polyurethane foams*, Thesis, School of civil Engineering Department of Geotechnical Engineering, Chalmers Univ. of technology, Gotëborg (Suede), 149 p.
- AUSTIN, S., ROBINS, P. and PAN, Youguang (June 1995) *Tensile bond testing of concrete repairs*, Materials and Structures, Rilem Technical Committees, Vol. 28, N° 79, pp. 249-259
- BAKER, J.W. (1999) *Vault repair provides insights into effective PU grouting*, Concrete Construction, Vol. 44, n° 2, pp. 94-98
- CHÈZE, J. et le groupe de travail n° 14 (Mars/Avril 1997) *Recommandations relatives à l'emploi des injections pour la réhabilitation d'ouvrages souterrains visitables*, Tunnels et Ouvrages Souterrains (Association Française des Travaux En Souterrains), n°46, pp.103-134
- CHRISTMAN, D.L. et TUKE, D. (October 1985) *A tunnel is saved*, Proceedings of the SPI Annual Technical/Marketing Conference 29th. Magic of Polyurethane, Reno (USA), pp. 190-193
- CHRISTMAN, D.L. et TUKE, D. (November 1985) *Polyurethane, foaming at the tunnel's edge*, Tunnels and Tunneling, p. 5
- COOK, J.P. (1970) *Construction sealants and adhesives*, John Wiley&sons Inc., New York, pp. 161-177
- CORNEILLE, A. (1986) *Procédure de qualification des produits de réparation du béton appliquée en France*, Proceedings of the RILEM International Symposium, Aix en Provence (France), pp.625-633
- GAUL, R.W. (May /June1993) *Flexible Polymers and Foams for Crack Repair*, Concrete Repair bulletin, vol. 6, n. 3, pp. 10-12

- GRICE, R.H. (1972) *Géologie de l'ingénieur à Montréal*, Congrès Géologique International-24^{ème} session, Montréal (Canada), 16 p.
- GRIMM, D. et PARISH, W.C.P. (September 1985) *Foam grout saves tunnel*, Civil engineering / ASCE, pp.64-66
- HALLS, L. (September/October 1997) *Polyurethane and acrylic injection resin for tunnel repairs*, Construction repair, pp. 14-16
- HATAT, D. (Mai 1988) *Polyuréthannes PUR*, Techniques de l'ingénieur, Vol. A3, n. 3425, pp. 1-23
- HEBERT, V P., LELITO, P.E. et NAUDTS, A. (October 1996) *Seepage stoppers*, Civil Engineering, pp. 68-70
- HEMOND, M.G. (1985) *Les réparations d'étanchéité en souterrain*, texte des recommandations du groupe de travail N°9 de l'AFTES (Association Française des Travaux en Souterrain), Paris, pp. 79-93
- HEMOND, M.G. (Mai 1995) *Utilisation des polymères liquides dans le génie civil*, Techniques de l'ingénieur, Vol. C5, n° 5435, pp. 1-8
- JIACAI, L., BAOCHANG, W., WENGGUANG, C., YUHUA, G. et HESHENG, C. (1982) *Polyurethane grouting in hydraulic engineering*, Proceeding of the conference on Grouting In geotechnical Engineering, ASCE publications, New Orleans (USA), pp.403-417
- JONES, M. (March 1995) *More choices to solves old problems*, Tunnels and Tunnelling, Vol. 27, N° 3, Morgan-Grampian plc, London, pp.71-74
- JOYCE, J.T. (July 1992) *Polyurethane grouts use to stop water leakage through cracks and joints*, Concrete Construction, pp. 551-555
- JULIEN, A. (1993) *Tunnels en service - traitement contre les venues d'eau - Fiches de cas*, document interne au CETU (Centre d'Étude des Tunnels), Bron, France (non publié)
- KALLEL A., PAILLÈRE A.M., et SERRANO, J.J. (1986) *Modifications apportées par les variations de températures sur l'adhérence des résines époxydes injectées dans les fissures de structures en béton*, proceedings of the RILEM International symposium, Aix en Provence (France), pp. 410-418
- KAROL, R.H. (1990) *Chemical grouting*, 2^{ème} édition, Éd. Marcel Dekker, New York, 465 p.
- KLEINLOGEL, A. (1960) *Joints de dilatation dans la construction en béton et en béton armé*, Edition Eyrolles, Paris, pp. 311-320

- KOMATKA, S. H., PANARESE, W.C., GISSING, K.D. et MACLEOD, N.F. (1995) *Dosage et contrôle des mélanges de béton*, Portland Cement Association, Ottawa, Canada, pp. 154-165
- LA PENTA, B.A. (1992) *Tunnel seepage control by the interior grouting method*, Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, vol. 1, pp. 436-448
- LAVOIE, L.P. (1968) *Le Pont Tunnel Lafontaine, vidéocassette*, *Ministère de la communication du Québec, Canada*
- LEPAGE, N.(1996) *Modélisation tridimensionnelle régionale et locale de l'écoulement de l'eau souterraine sur l'île de Montréal*, mémoire de Maîtrise es Sciences Appliquées, spécialité Sciences de la Terre, Université du Québec, INRS-Géoressources, 354 p.
- LIU, J. C. (September 1981) *Principles and techniques of polyurethanes grouting*. US Dept. of the Interior, Denver, Colo (USA), 11 p.
- LOMBARDI, G. (1985) *The Role of Cohesion in Cement Grouting of Rock*, 15th International Congress on Large Dams, Q.58, R.13, Lausanne, vol.3, pp. 235-262
- LUKINS, P. (May 1988) *Tunnel rehabilitation encourages innovation*, Tunnels&Tunnelling, pp. 21-22
- MAILVAGANAM, N.P. (1992) *Repair and protection of concrete structures*, CRC Press Inc, New-York, 473 p.
- MAXWELL-COOK, J.C. (1967) *Structural Waterproofing*, Butterworth, London, 59 p.
- MCGOVERN, M.S. (April-May 1996) *Grouting combination repairs sewer pipe*, Aberdeen's Concrete Repair Digest, vol.7, n.2, pp. 94-100
- OLINGA, R. (May /June1993) *Polyurethane Systems for Sealing and Repairing Cracks and Joints*, Concrete Repair bulletin, vol. 6, n. 3, p. 14-15
- PALARDY, D. et BALLIVY, G. (June 1997) *Behavior of bituminous waterstops covered with fine gravel subjected to tensile and shear stresses*, Proceedings of the International Conference on Engineering Materials, Ottawa (Canada), pp. 365-377
- PATRICK, R.L. (1973) *Treatise on adhesion and adhesives*, vol. 3, Marcel Dekker Inc., New York, pp.67-69.
- PERKINS, P.H. (1976) *Concrete structures : repair, waterproofing and protection*, Applied Science Publishers Ltd, London, p. 22, pp. 91-95, p.175
- POUPELLOZ, B. et CHAPEAU, C. (1985) *Travaux d'Injections pour ouvrages souterrains*, texte des recommandations du groupe de travail N°8 de l'AFTES (Association Française des Travaux en Souterrain), Paris, pp. 31-78

- RUCKSTUHL, F. (December 1987) *Foiling Water ingress in Swiss road tunnels*, Tunnels & Tunneling, pp. 27-29
- RUSSELL, E. (May 1997) *Waterproofing tunnels*, Tunnels&Tunnelling International, pp.50-52
- RUSSELL, H.A. (June 1993) *The control of groundwater in tunnel rehabilitation*, Proceedings of the 1993 Rapid Excavation and Tunneling Conference, Boston (USA), Parsons Brinckerhoff Quade & Douglas, Inc, pp. 505-513
- RUSSELL, H.A. et BREGOLI, W.H. (February 1993) *Rehabilitation of Boston's Green Line Tunnel*, Concrete International, Parsons Brinckerhoff Quade and Douglas Inc, Vol. 15, N° 2, pp. 54-56
- SASSE, H.R. et FIEBRICH, M. (July-August 1983) *Bonding of polymer materials to concrete*, Materials and Structures, Rilem Technical Committees, Vol. 16, N° 94, pp. 293-301
- SEBBAGH, F. (1995) *Développement de méthodes de réfection des lames d'étanchéité dans les structures hydrauliques en béton*, Mémoire de Maîtrise es Sciences Appliquées, spécialité génie civil, Université de Sherbrooke, 171 p.
- SCHULZE, W. et MUNSE, M. (Mai-Juin 1978) *Caractérisation de la surface du béton considérée dans le cas d'une liaison béton/résine synthétique*, Matériaux et Constructions, Commissions techniques Rilem, Vol. 11, N° 63, pp. 185-190
- SHAW, J.D.N. (November 1985) *Resins in construction*, International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, vol. 7, n. 4, pp. 217-223
- SMOAK, W.G. (Dec. 1988) *Polyurethane injection stops water tunnel leaking*, Concrete Construction, Vol.33, n°12, pp. 1073-1075
- VANCE, J.S. (1994) *Practical seepage control in existing tunnels*, Proceedings of the 3rd Materials Engineering Conference, San Diego (USA), pp. 888-895
- VARLAN, G.E. (1964) *L'étanchéité dans la construction*, Edition Eyrolles, Paris, pp. 376-416
- VINSON, T.S. (March 1970) *The application of polyurethane foamed plastic in soil grouting*, Thesis (Ph. D. in Engineering), Univ. of California, Berkeley (USA), 229 p.
- WALLIS, S. (May 1983) *Rehabilitation of the 110 year old Baltimore and Potomac rail tunnel*, Tunnel & Tunnelling, pp.52-54
- WARING, S.T. (August 1986) *Chemical grouting of water-bearing cracks*, Concrete International, Vol. 8, N° 8, pp. 16-21

ANNEXES

ANNEXE A :
Fiches techniques des principaux produits testés

- H 100
- F1000
- Jthane
- PF930
- 900 LVSF

**RÉSINE DE POLYURÉTHANE
MONOCOMPOSANT AQUARÉACTIF**

H 100

DESCRIPTION:

H 100: résine d'injection de polyuréthane aquaréactive. Produit monocomposant sans solvant et non toxique, qui réagit avec l'eau pour former une mousse hydrophobe semi-rigide et résistante à l'attaque chimique. Une fois écoulé le temps de prise, la mousse se transforme en matière inerte.

COMPOSITION:

RÉSINE - prépolymère avec isocyanates (MDI)
ACCÉLÉRATEUR - accélérateurs d'alkylamine

APPLICATION:

La résine **H 100** convient à l'étanchéisation des tunnels souterrains, des métros, des chambres, des excavations et des fissures de parois rocheuses, même en présence d'importantes venues d'eau à forte pression.

Pour contrôler le mécanisme de réaction, qui peut s'échelonner entre quelques minutes et plusieurs heures, il suffit de varier la dose d'accélérateur entre 1% et 10 %, compte tenu des conditions du site. Le produit final est une mousse semi-rigide qui ne rétrécit pas et ne gonfle pas après le temps de prise.

CARACTÉRISTIQUES:

Composant	<u>RÉSINE</u>	<u>ACC</u>
Densité (20°C)	1,15	0,995
Viscosité (25°C)	100 cPo	25 cPo
Couleur	brun	noir

PRÉPARATION ET APPLICATION DU PRODUIT:

1. Selon le temps de prise visé, ajoutez entre 1% et 10% d'accélérateur à la résine.
2. Mélangez soigneusement jusqu'à l'obtention d'une substance homogène.
3. Injectez à l'aide d'une pompe d'injection à un composant.
4. Nettoyez la pompe et l'équipement avec un solvant approprié à intervalles réguliers de quelques heures, ou une fois que l'injection est terminée.

CONDITIONNEMENT:

RÉSINE - bidons de 20 kg
ACCÉLÉRATEUR - bouteilles de 2 kg



MULTIURETHANES

Suppliers of grouting materials, equipment
and engineering support services

**RÉSINE DE POLYURÉTHANE
MONOCOMPOSANT AQUAREACTIF**

F 1000

DESCRIPTION:

F 1000: résine d'injection de polyuréthane aquaréactive. Produit monocomposant sans solvant et non toxique, qui réagit avec l'eau pour former une obturation permanente, à la fois flexible et hydrophobe.

COMPOSITION:

RÉSINE - prépolymère avec isocyanates (MDI)
ACCÉLÉRATEUR - accélérateurs d'alkylamine

APPLICATION:

La résine **F 1000** s'utilise pour l'étanchéisation des joints de construction et de dilation instables, même en présence d'infiltrations ou de fuites importantes.

Pour contrôler le mécanisme de réaction, qui peut s'échelonner entre quelques minutes et plusieurs heures, il suffit de varier la dose d'accélérateur entre 1% et 10 %, compte tenu des conditions du site.

Un joint ou un bouchon flexible se forme dans la fissure ou le joint et demeure stable, sans rétrécir ni gonfler.

CARACTÉRISTIQUES:

Composant	<u>RÉSINE</u>	<u>ACC</u>
Densité (20°C)	1,05	0,995
Viscosité (25°C)	600 cPo	25 cPo
Couleur	blanc	noir

PRÉPARATION ET APPLICATION DU PRODUIT:

1. Selon le temps de prise visé, ajoutez entre 1% et 10% d'accélérateur à la résine.
2. Mélangez soigneusement jusqu'à l'obtention d'une substance homogène.
3. Injectez à l'aide d'une pompe d'injection à un composant.
4. Nettoyez la pompe et l'équipement avec un solvant approprié à intervalles réguliers de quelques heures, ou une fois que l'injection est terminée.

CONDITIONNEMENT:

RÉSINE - bidons de 20 kg
ACCÉLÉRATEUR - bouteilles de 2 kg

FICHE TECHNIQUE J-THANE

Description :

J-THANE est une résine d'injection monocomposante hydrophobe pour le colmatage des venues d'eau importantes. L'eau ou l'humidité dans les cavités injectées participe à la réaction qui est ajustable selon le dosage de l'accélérateur J-THANE.

Une fois réagit avec l'eau, cette résine de polyuréthane forme une mousse semi-rigide à cellules fermées.

Utilisations :

Injection de fissures de dimensions variées

Stabilisation des sols

Contrôle d'infiltration d'eau pour : réservoirs, tunnels, fondations, barrages, égouts, décanteurs, écluses, joints d'expansion, cavités dans le béton

Avantages :

Basse viscosité, permettant une bonne pénétration

Réaction rapide avec l'eau

Sans solvant

Non corrosif

Mousse stable, non toxique

Bonne résistance aux produits chimiques

Propriétés physiques typiques :

	<u>Résine</u>	<u>Accélérateur</u>
Aspect physique :	liquide	liquide
Couleur :	brun	rosée, clair
Matières solides (ASTM D-1010) :	100 %	-
Viscosité à 23°C (ASTM D-1638) :	125 ± 20 cps	15 à 20 cps
Point d'éclair (ASTM D-93) :	175°C	155°C
Poids (ASTM D-1638) :	1,1 kg/l ± 3%	-

Produit réagi (peut varier selon les conditions) :

Résistance en compression :	7 à 10 MPa
Toxicité :	non toxique
Souplesse (déformation sous pression) :	20 à 25 %
Expansion libre :	environ 15 fois son volume

Produit réagi (suite) :

Expansion confinée :	3 à 5 fois son volume
Résistance aux pressions d'eau :	jusqu'à 50 mètres
Retrait :	aucun
Densité :	175 à 450 kg/m ³

Vitesse de réaction (eau et matériel à 23°C) :

Accélérateur % en poids	* Temps d'induction	Temps de gelification
1	2 min 40 sec	11 min
5	1 min 20 sec	3 min 20 sec
10	45 sec	1 min 45 sec

* Temps de contact sans réaction avec l'eau.

Application :

Il est suggéré de contacter votre représentant des produits Krytex pour vérifier les méthodes recommandées pour des applications spécifiques.

Le J-THANE peut être injecté avec des pompes manuelles, électriques ou à air. L'accélérateur est requis et les surfaces à injecter doivent être humides ou mouillées pour provoquer la réaction.

Il est suggéré de vérifier le temps de réaction selon la qualité, la quantité et la température de l'eau.

Emballage :

Résine : seaux de 20 kg (18 l)
Accélérateur : bidons de 950 ml

Entreposage :

Garder les contenants dans un endroit frais et sec. Les contenants devraient être bien fermés et à l'abri de l'humidité.

AVIS : Pour usage industriel seulement.
Consulter la fiche signalétique.

Ces informations résultent d'essais que nous estimons valables. Cependant, lors de l'utilisation, les conditions d'application étant indépendantes de notre volonté, le vendeur et/ou le fabricant déclinent toute responsabilité, sauf celle de remplacer le produit prouvé défectueux.

AMBEX

PRIME-FLEX 930

DESCRIPTION DU PRODUIT :

Le *Prime-Flex 930* est une résine d'injection, aqua-réactive à base de pré-polymères, Déphényl Méthane Méthacrylates (MDI). Une fois mélangé au catalyseur Prime-Kat 93, ce polyuréthane liquide réagit à l'eau pour former une mousse semi-rigide à forte densité (cellules fermées) et colmater les infiltrations d'eau. Cette mousse résistante est impénétrable par l'eau et est conçue pour étanchéiser les fissures dans le béton, le roc et les structures de maçonnerie.

UTILISATIONS :

- Tunnels (Métro et Autoroute)
- Joints d'expansion
- Regards d'égout
- Murs de fondation
- Puits d'ascenseurs
- Joints froids
- Barrages de béton
- Réservoirs d'eau
- Structures sous-terraines
- Conduites électriques

AVANTAGES :

- Sans solvant
- Semi-rigide
- Mousse très résistante
- Jusqu'à 2,200 % d'expansion
- Très basse Viscosité
- Hydrophobe (cellules fermées)
- Bonne résistance aux produits chimiques

CONDITIONNEMENT :

Contenants de 19 litres ou de 205 litres.

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES (RÉSINE) (23° C.)

Apparence	: Liquide Brun.
Viscosité	: 200 CPS
Poids par gallon	: 9,41 lbs / gallon
Contenant solide	: 100 %

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES (PRIME-KAT 93) (23° C.)

Apparence	: Liquide Brun.
Viscosité	: 15-20 CPS
Poids par gallon	: 8,73 lbs. / gallon
Contenant solide	: 100 %

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES (MOUSSE)

Résistance à la traction (ASTM D-1623)	: 139 P.S.I.
Élongation (ASTM D-1623)	: 10 %
Retrait (ASTM D-1042 / D-756)	: < 1 %
Résistance cisaillement (ASTM D-3574)	: 6 lbs / po.
Densité (ASTM D-3674)	: 125kg / m ³

TEMPS DE RÉACTION (23° C.)

<u>PRIME-KAT CLEAR</u> (PAR VOLUME)	<u>RÉACTION</u>	<u>GEL</u>
1 %	4 minutes	18 minutes
2 %	2 minutes	12 minutes
6 %	1 minute	3 minutes
10 %	38 secondes	2 minutes

Ces résultats sont basés sur une mousse mûrie sous pression. Ces propriétés peuvent varier selon la condition du chantier.



• 900 LVSF •

DESCRIPTION AND USES:

Prime-Flex 900LVSF is a liquid polyurethane injection resin designed to permanently seal leaks in concrete and masonry structures. When it comes in contact with water, Prime-Flex 900LVSF expands up to 700% and forms a tough, flexible foam seal that can not be penetrated by water. Prime-Flex 900LVSF has been proven successful in the following applications:

- Expansion Joints
- Manholes
- Swimming Pools
- Foundation Walls
- Elevators and Service Pits
- Tunnels (Subways and Highways)
- Cold Joints
- Concrete Dams
- Water Holding Tanks
- Below Grade Parking Decks
- Unshielded Electrical Conduit

The uses of Prime-Flex series of resins is limited only by the imagination of the designer or contractor. Prime-Flex 900LVSF is based on TDI in combination with polyether polyols.

ADVANTAGES:

- Single Component (no catalyst required)
- Solvent Free
- Extremely Flexible
- Very Tough Foam
- Up to 700% Expansion
- Low Viscosity
- Hydrophilic

ANSI / NSF STANDARD 61
POTABLE WATER
APPROVED



LISTED
3P88
PRIME-FLEX 900LVSF

PACKAGING:

- 1 Gallon Units
- 5 Gallon Units
- "Quick Mix" Cartridges
- Single Shot Cartridges

TYPICAL PHYSICAL PROPERTIES AT 73° F (23°C).

Appearance	Amber Liquid
Viscosity	450-550 CPS
Weight Per Gallon	9.0 Lbs. Per Gallon
Solids Content	100%
Induction Time	3 to 4 Minutes
Cure Time	6 to 7 Minutes

CURED FOAM TEST RESULTS*

Tensile Strength	(ASTM D-1623)	52 P.S.I.
Elongation	(ASTM D-1623)	280%
Shrinkage	(ASTM D-1042 / D-756)	less than 2%
Initial Linear Shrinkage		5%
Tear Resistance	(ASTM D-3574)	20 lbs/in
Density	(ASTM D-3574)	494 kg / m ³

* These results were based on a foam cured under pressure. Properties may vary depending on job conditions.

ANNEXE B :
Résultats des essais de compatibilité

- PR 930
- PR940
- H100
- F1000
- Jthane Flex
- Jthane
- Polygrout II
- Polygrout III

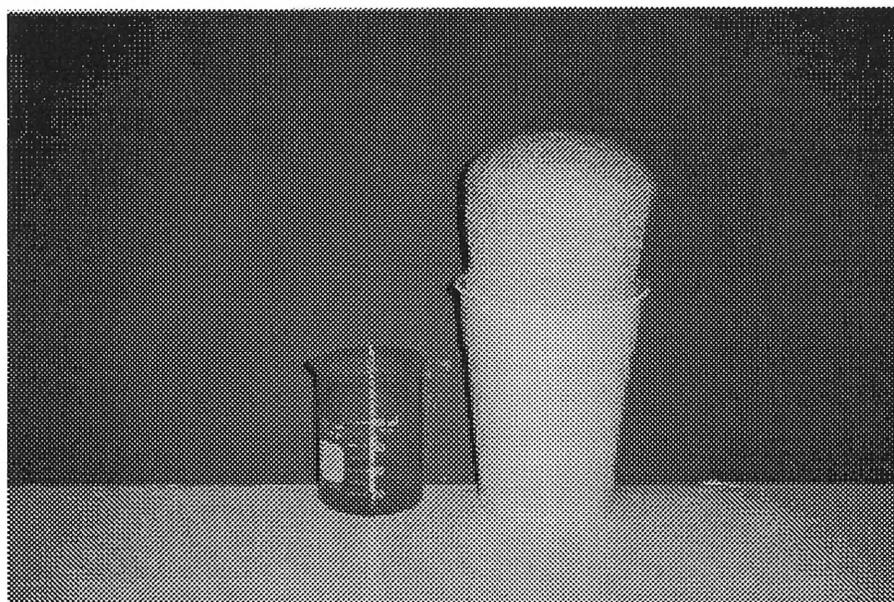
Résine hydrophobe semi-rigide Prime-Flex 930 (Ambex/Prime-Resins)

TABLEAU B1 : ESSAIS PRÉLIMINAIRES-PF 930

Température d'essai : 20° C (eau : 19°C)

Quantité de résine : 20 ml

N° Éch	Acc. (%)	Eau (%)	TI (min, s)	TF (min, s)	EXP (libre)
#1	2	10	00:40	03:00	25
#2	4	10	00:40	01:35	30
#3	5	10	00:25	01:15	35
#4	8	10	00:18	00:45	30
#5	10	10	00:15	00:40	35



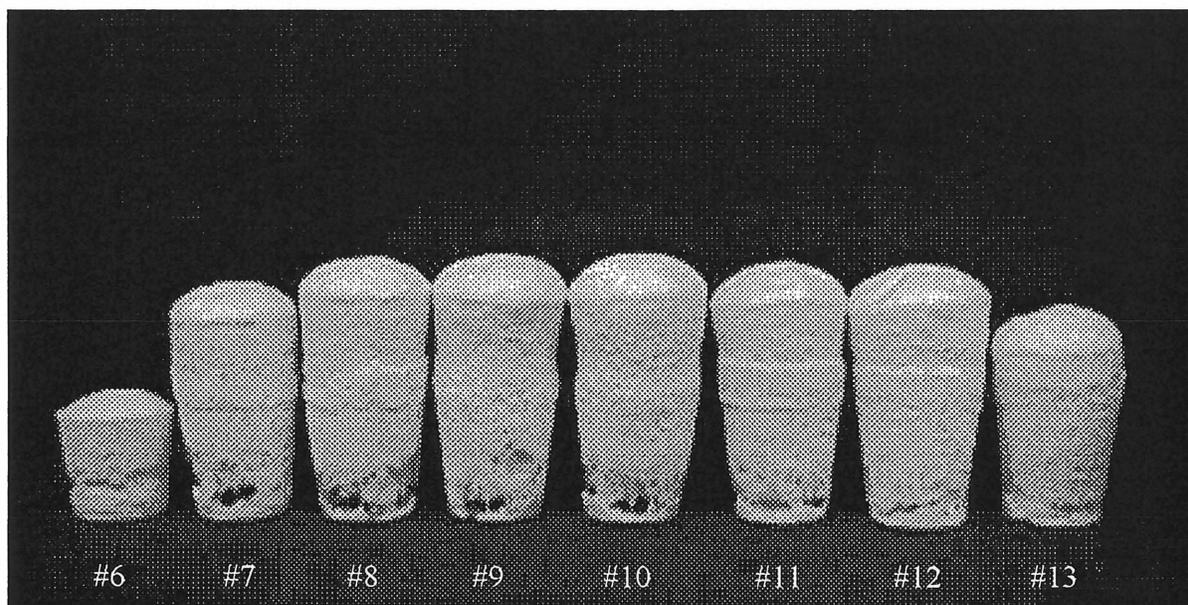
Observations : Mousse jaunâtre semi-rigide, à bulles moyennes et fermées.
Réaction très rapide et expansion libre très importante (max. 35)

TABLEAU B2 : INFLUENCE DE LA QUANTITÉ D'ACCÉLÉRATEUR-PF 930

Température d'essai : 20° C (eau : 19°C)

Quantité de résine : 20 ml

N° Éch.	Eau (%)	Acc. (%)	Tl (min, s)	TF (min, s)	EXP libre
#6	5	1	00:55	04:30	14
#7	5	2	00:32	03:10	32
#8	5	3	00:25	01:55	36
#9	5	4	00:18	01:25	36
#10	5	5	00:20	01:12	36
#11	5	7	00:16	00:55	34
#12	5	10	00:12	00:38	34
#13	5	20	00:08	00:28	25



Observations : A partir de 10 % d'accélérateur, le réseau de bulles est moins uniforme et les bulles sont plus grossières.

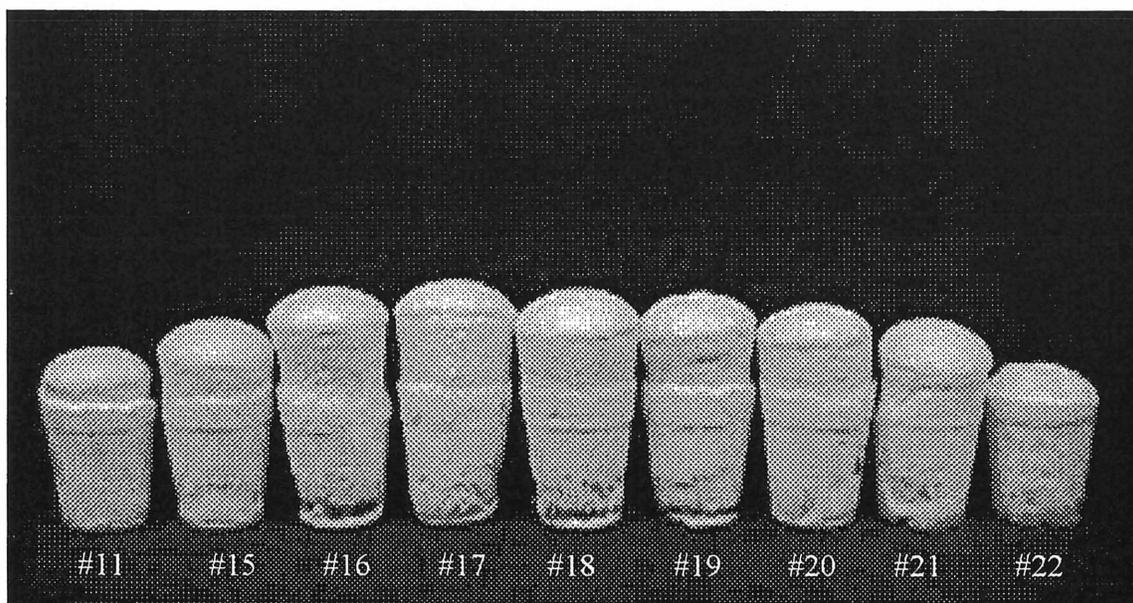
TABLEAU B3 : INFLUENCE DE LA QUANTITÉ D'EAU-PF 930

Température d'essai : 20° C (eau : 19°C), Quantité de résine : 20 ml

N° Éch	Acc. (%)	Eau (%)	TI (min, s)	TF (min, s)	EXP Libre
#11	5	2	00:25	01:30	27
#15	5	3	00:25	01:20	32
#16	5	5	00:20	01:10	35
#17	5	7	00:20	01:07	37
#18	5	10	00:18	01:10	34
#19	5	15	00:20	01:30	32
#20	5	20	00:23	01:40	29
#21	5	50	00:28	01:50	22
#22	5	100	00:50	02:30	12

TABLEAU B4 : RETRAIT AU SÉCHAGE DES ECHANTILLONS-PF 930

N° Éch	M 0j (g)	M 7j (g)	M14j (g)	M21j (g)	M28j (g)
#11	21,4	20,1	20,1	20,1	19,9
#15	21,6	20,1	20,1	20,1	19,8
#16	22	20	20	20	20
#17	22,4	19,3	19,3	19,3	19,4
#18	23	19,7	19,7	19,7	20,1
#19	24	19,6	19,6	19,5	19,5
#20	25	19,7	19,7	19,6	19,5
#21	31	24	21,1	19,8	19,5
#22	41	31,7	27,8	24,7	20,3



Observations : A partir de 20% d'eau, l'expansion de la mousse est plus faible, (L'expansion est gênée par l'excès d'eau)

Résine hydrophobe flexible Prime-Flex 940 (Ambex/Prime-Resins)

TABLEAU B5 : INFLUENCE DE LA QUANTITÉ D'EAU-PF 940

Température d'essai : 20° C (eau : 19°C)

Résine : 20 ml

N° Échantillon	Acc. (%)	Eau, (%)	TI (min, s)	TF (min, s)	Expansion libre
#1	2	2	00:45	02:50	19
#2	2	3	00:42	02:45	23
#3	2	5	00:33	02:40	27
#4	2	7	00:38	02:30	26
#5	2	10	00:42	03:30	25
#6	2	15	01:00	04:15	23
#7	2	20	01:40	05:30	18
#8	2	50	01:45	06:00	12
#9	2	100	01:40	06:30	7

TABLEAU B6 : INFLUENCE DE LA QUANTITÉ D'ACCÉLÉRATEUR-PF 940

Température d'essai : 20° C (eau : 19°C)

Résine : 20 ml

N° Échantillon	Eau (%)	Acc. (%)	TI (min, s)	TF (min, s)	Expansion libre
#10	5	1	00:45	03:50	20
#11	5	2	00:35	03:00	25
#12	5	3	00:30	02:35	27
#13	5	4	00:25	01:40	29
#14	5	5	00:23	01:20	29
#15	5	7	00:15	01:00	30
#16	5	10	00:10	00:40	29

Observations Mousse jaunâtre flexible, à bulles moyennes et fermées.
Réaction très rapide et expansion libre très importante (max. 30)

Résine hydrophile 900 LVSF (Ambex/Prime-Resins)

TABLEAU B7 : ESSAIS PRÉLIMINAIRES-900 LVSF

Température d'essai : 20° C (eau : 19°C)
 Résine : 50 ml

N° Échantillon	Eau (%)	Tl (min, s)	TF (min, s)	Expansion libre
#1	10	00:45	03:30	4,2
#2	20	00:25	03:30	7,5
#3	30	00:30	03:10	6,5
#4	50	00:40	02:25	5
#5	100	00:45	02:35	3,5
#6	200	00:55	03:30	2,3

TABLEAU B8 : INFLUENCE DE LA QUANTITÉ D'EAU -900 LVSF

Température d'essai : 20° C (eau : 19°C)

N° Échantillon	Eau (%)	Tl (min, s)	TF (min, s)	Expansion libre
#1	5	01:00	04:00	1,9
#2	10	00:45	03:30	4,2
#3	15	00:50	03:30	7,6
#4	20	00:25	03:30	7,5
#5	30	00:30	03:10	6,5
#6	50	00:40	02:25	5
#7	100	00:45	02:35	3,5
#8	150	00:50	03:30	2,6
#9	200	00:55	03:30	2,3

TABLEAU B9 : RETRAIT AU SÉCHAGE DES ÉCHANTILLONS-900 LVSF

N° Échantillon	M 0j (g)	M 7j (g)	M14j (g)	M21j (g)	M28d (g)
#1	52,5	49,2	49,2	48,8	48,5
#2	55	50	48,8	48,8	48,8
#3	57,5	49,5	49,5	49,3	48,2
#4	60	51,3	49,8	49,8	49,7
#5	65	53,1	49,2	49,1	48,9
#6	75	59,25	51,5	49,7	49,6
#7	100	80,1	68,7	63,7	57,4
#8	125	99,7	89,2	80,8	67,8
#9	150	132,8	88	81,8	74,3

Résine hydrophobe semi-rigide Universal H 100 (Multiurethanes)

TABLEAU B10 : ESSAIS PRÉLIMINAIRES-H 100

Température d'essai : 20° C (eau : 20°C)

Résine : 50 ml

Date : 15 juillet 97

N° Échantillon	Acc. (%)	Eau (%)	TI (min, s)	TF (min, s)	pansion libre
#1	10	10	00:30	02:00	
#2	10	10	00:25	01:40	>10
#3	5,5	10	00:40	01:50	>10
#4	2,5	10	01:20	04:30	10
#5	2	20	01:30	05:45	8
#6	1,5	5	01:30	06:00	8
#7	1	10	01:30	06:00	10
#8	1	20	02:00	08:30	8
#9	1	50	02:10	10:00	4,5
#10	1	5	01:40	06:30	>10

TABLEAU B11 : INFLUENCE DE LA QUANTITÉ D'EAU -H 100

N° Échantillon	Acc. (%)	Eau (%)	TI (min, s)	TF (min, s)	Expansion libre
#1	5	2	00:50	02:30	11
#2	5	3	00:37	02:17	21
#3	5	5	00:36	02:15	21
#4	5	7	00:33	02:10	21
#5	5	10	00:29	02:05	21
#6	5	15	00:30	02:10	20
#7	5	20	00:30	02:32	19
#8	5	50	00:55	03:30	11
#9	5	100	00:58	04:00	6

TABLEAU B12 : INFLUENCE DE LA QUANTITÉ D'ACCÉLÉRATEUR-H 100

N° Échantillon	Eau (%)	Acc. (%)	TI (min, s)	TF (min, s)	Expansion libre
#10	10	10	00:30	02:00	
#11	10	10	00:25	01:40	>10
#12	10	5,5	00:40	01:50	>10
#13	10	2,5	01:20	04:30	10
#14	10	1	01:30	06:00	10

Résine hydrophobe flexible F 1000 (Multiurethanes)

TABLEAU B13 et B14 : ESSAIS PRÉLIMINAIRES-F 1000

Date : 7 juin 1997

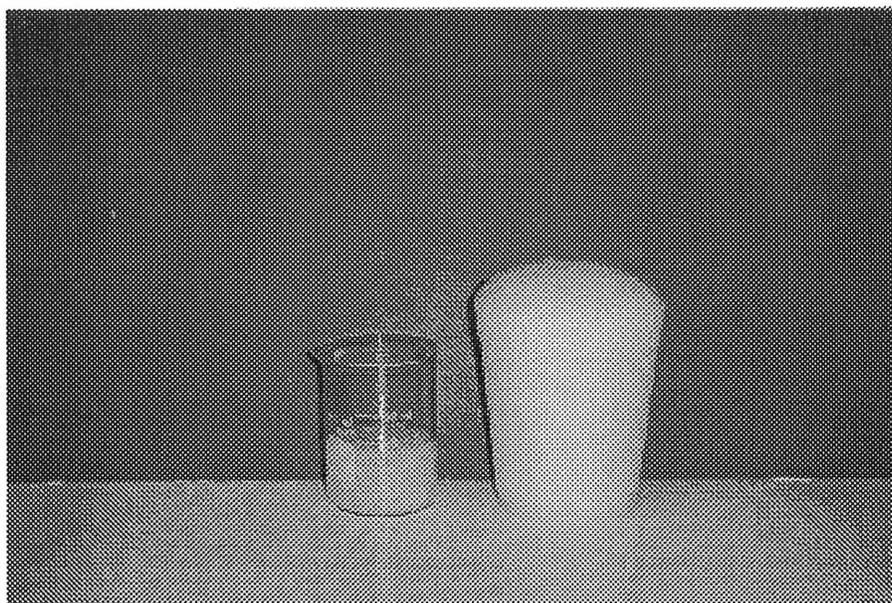
Température d'essai : 18 C, Résine : 50 ml

N° Échantillon	Acc. (%)	Eau (%)	TI (min, s)	TF (min, s)	Expansion libre
#1	10	10	0:45	1:45	5
#2	20	10	0:20	1:00	6,5
#3	5	10	0:75	3:20	6
#4	10	5	1:00	2:30	6,5
#5	10	20	1:00	2:40	4
#6	10	0	/	/	aucune
#7	0	10	/	>30□	aucune

Date : 15 Juillet 1997

Température d'essai : 20° C, Résine : 50 ml

Échantillon	Acc. (%)	Eau %	TI (min, s)	TF (min, s)	Expansion libre
#8	10	10	01:10	03:00	4,5
#9	10	20	01:30	03:05	4
#10	10	5	01:00	02:30	5
#11	10	50	01:45	03:25	3
#12	20	10	00:40	01:40	5
#13	5	10	00:50	04:45	4,5
#14	2,2	10	03:00	08:30	4



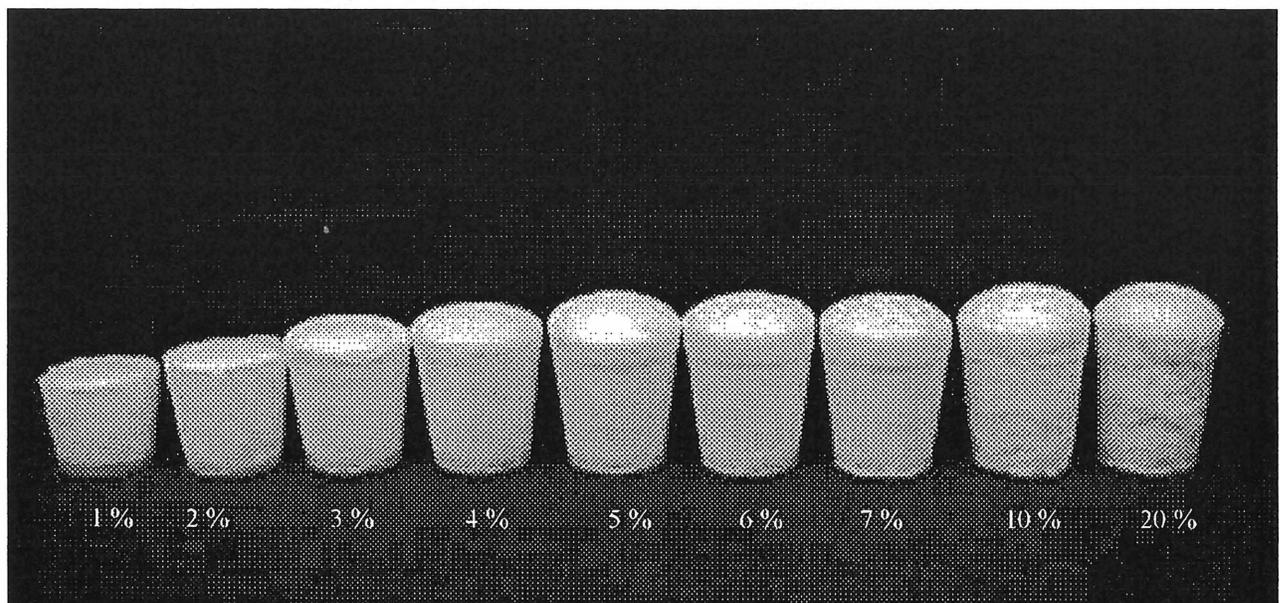
Expansion de la mousse F1000 (avant et après réaction avec quelques gouttes d'eau)

TABLEAU B15 : INFLUENCE DE LA QUANTITÉ D'EAU -F 1000

N° Échantillon	Eau (%)	Acc. (%)	TI (min, s)	TF (min, s)	Expansion libre
#15	2	5	00:50	02:30	11
#16	3	5	00:37	02:17	21
#17	5	5	00:36	02:15	21
#18	7	5	00:33	02:10	21
#19	10	5	00:29	02:05	21
#20	15	5	00:30	02:10	20
#21	20	5	00:30	02:32	19
#22	50	5	00:55	03:30	11
#23	100	5	00:58	04:00	6

TABLEAU B16 : INFLUENCE DE LA QUANTITÉ D'ACCÉLÉRATEUR-F 1000

N° Échantillon	Acc. (%)	Eau (%)	TI (min, s)	TF (min, s)	Expansion libre
#24	1	5	03:20	09:30	4,5
#25	2	5	02:05	05:35	5,8
#26	3	5	01:32	04:25	7
#27	4	5	01:20	03:30	7,5
#28	5	5	01:05	03:05	7,8
#29	6	5	01:00	02:40	8,3
#30	7	5	00:55	02:30	8,6
#31	10	5	00:40	01:55	9,6
#32	20	5	00:30	01:15	8,8



Observations : A partir de 10% d'accélérateur, on observe un léger retrait de la mousse

TABLEAU B17 : RETRAIT AU SÉCHAGE DES ECHANTILLONS-F 1000

N° Échantillon	M0j (g)	M1j (g)	M7j (g)	M14j (g)
#15	51,7	50,32	49	49
#16	52,2	50,58	49,5	49,5
#17	52,4	50,83	49,8	49,81
#18	53,3	51,56	50,7	50,78
#19	53,8	52,06	51,01	51,09
#20	54,1	52,41	51,41	51,48
#21	54,7	52,91	51,93	52,01
#22	56,2	54,39	53,38	53,4
#23	61,1	59,13	58,32	58,3

Résine hydrophile Polygrout II (Mulco)

TABLEAU B18 : ESSAIS PRÉLIMINAIRES-Polygrout II

N° Échantillon	Eau (%)	TI (min, s)	TF (min, s)	Expansion libre
#1	1 : 1	1 : 20	5 : 00	3,5
#2 *	1 : 1	1 : 20	5 : 00	3,5
#3	2 : 1		5 : 00	12
#4	1 : 2		5 : 50	5,5
#5	1 : 6		5 : 50	8
#6	6 : 1			1

Résine hydrophile Polygrout III (Mulco)
--

TABLEAU B19 : ESSAIS PRÉLIMINAIRES-Polygrout III

N° Échantillon	Eau (%)	TI (min, s)	TF (min, s)	Expansion libre
#1	1 : 1	0 : 30	3 : 00	3,5
#2 *	1 : 1	0 : 30	3 : 00	3,5
#3	3 : 1	1 : 15	4 : 30	2
#4	1 : 3	0 : 30	2 : 00	1

Résine hydrophobe semi-rigide Jthane (Krytex)

TABLEAU B20 : ESSAIS PRÉLIMINAIRES-Jthane

Date : 3 Février 1998

Température d'essai : 20° C (eau : 17°C), Résine : 50 ml

N° Échantillon	Acc. (%)	Eau (%)	Tl (min, s)	TF (min, s)	Expansion libre
#1	2	10	01:15	05:30	12
#2	5	10	01:00	03:35	10
#3	8	10	00:40	02:15	18
#4	10	10	00:50	45:10,1	6

Observations : mousse blanche flexible, à bulles moyennes à très fines

- Peu d'expansion par rapport aux produits concurrents
- Réaction très lente lorsqu'on met trop d'accélérateur (comme si il y avait une deuxième réaction)

Résine hydrophobe flexible Jthane Flex (Krytex)

TABLEAU B21 : ESSAIS PRÉLIMINAIRES-Jthane Flex

Date : 3 Février 1998

Température d'essai : 19° C (eau : 19°C), Résine : 50 ml

N° Échantillon	Acc. (%)	Eau (%)	Tl (min, s)	TF (min, s)	Expansion libre
#1	10	10	00:25	01:05	6
#2	20	10	00:10	01:35	6
#3	5	10	00:45	01:30	6
#4	10	5	00:20	01:00	7
#5	10	20			6

ANNEXE C :
Essais sur Échantillons de béton fracturés

- **Résultats de l'injection des échantillons (Tableaux)**
- **Courbes d'évolution de la pression pendant l'injection et essais de traction**
- **Courbes d'évolution de la pression pendant l'injection, des essais cyclique et essai de traction après les essais cycliques**

TABLEAU C1 : RÉSULTATS DE L'INJECTION DE LA RÉSINE PF 930

N° Éch.	Fissure Condition et ouverture	Béton Temp. (°C)	Quantité de résine (g)	Mousse injectée (%)	Pmax (KPa)	Temps Pmax (min., s)
SRA1	Sèche, e = 8 mm	20	80	-	-	-
SRA2	Sèche, e= 5 mm	20	60	-	64	2:15
SRA3	Humide , e=5mm	20	60	-	53	2:10
SRA4	Humide e=5 mm	20	60	16	75	2:30
SRA5				14	45	2:30
SRA6				19	91	2:10
SRA7				16	38	2:00
SRA8				15	61	2:00
SRA9	Humide e=2 mm	5	50	17	65	2:10
SRA10				14	24	3:30
SRA11				39	163	4:10
SRA12				20	61	3:10
SRA13				17	63	3:20
SRA14				17	55	2:40
SRA15				23	80	5:40
SRA16				21	67	5:40
SRA17				15	36	5:40
SRA18				24	103	5:00
SRA19				17	77	5:50

TABLEAU C2 : RÉSULTATS DE L'INJECTION DE LA RÉSINE H 100

N° Éch.	Fissure : Condition et ouverture	Béton : Temp. (°C)	Quantité de résine (g)	Mousse injectée (%)	Pmax (KPa)	Temps Pmax (min., s)
SRB1	Humide, 5 mm	20	60	49	> 200	4
SRB2	Humide, 5 mm	20	60	29	69	5:10
SRB3	Fermée	5	50	15	92	2:00
SRB4	Humide, 2 mm	5	50	19	44	4
SRB5				32	66	12:30
SRB6				23	39	10:20
SRB7				23	244	8:00
SRB8				24	73	9:10
SRB9				24	31	10:10
SRB11				33	47	15:20
SRB13				22	42	10:40
SRB14				23	44	10:20
SRB15				25	83	11:10
SRB16				19	53	11:40

TABLEAU C3 : RÉSULTATS DE L'INJECTION DE LA RÉSINE F 1000

° Éch.	Fissure condition et ouverture	Béton Temp. (°C)	quantité de résine (g)	Mousse injectée (%)	Pmax (KPa)	Temps Pmax (min., s)
F1	mide, 5 mm	20	60	30	43	4
F2	mide, 5 mm	20	60	62	200	4
F3	mide, 5 mm	20	60	42	82	2:50

TABLEAU C4 : RÉSULTATS DE L'INJECTION DE LA RÉSINE 900 LVSF

N° éch.	Fissure Condition et ouverture	Béton Temp. (°C)	Quantité injectée (ml)		Mousse effectivement injectée (%)	Pmax (KPa)	Temps Pmax (min.: s)
			eau	résine			
Hi1	Humide, 5 mm		50	50	-	89	7
Hi2					-	148	28
Hi3							
Hi4					34	198	62
Hi5					40	255	53
Hi6					32	159	49
Hi7					34	219	82
Hi8	Humide, 2 mm	5			27	107	26
Hi9					30	137	40
Hi10					35	150	33
Hi11					33	143	24
Hi12					30	132	79
Hi13					39	213	94
Hi14					35	167	31
Hi15						191	62
Hi16						211	59
Hi17					38	184	49
Hi18					38	218	49

ESSAIS DE TRACTION (30 essais)

Courbes d'évolution de la pression pendant l'injection de échantillons (Pression vs Temps)

Courbes des essais de traction (Contrainte vs déformation)

Type produit	Hydrophobe semi-rigide PF930	Hydrophobe semi-rigide H100	Hydrophobe flexible F 1000	Hydrophile 900 LVSF
Nombre d'essais	12	8	2	8
N° Échantillon	SRA1 SRA2 SRA3 SRA4 SRA5 SRA9 SRA10 SRA15 SRA16 SRA17 SRA18 SRA19	SRB1 SRB2 SRB3 SRB4 SRB5 SRB9 SRB1 SRB13	F1 F2	Hi2 Hi3 Hi4 Hi6 Hi11 Hi13 Hi14 Hi18

ESSAIS CYCLIQUES (21 essais)

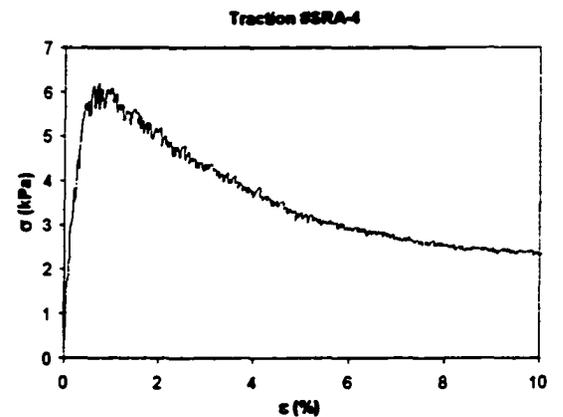
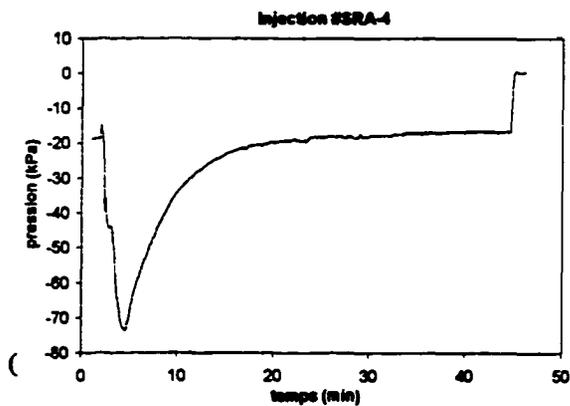
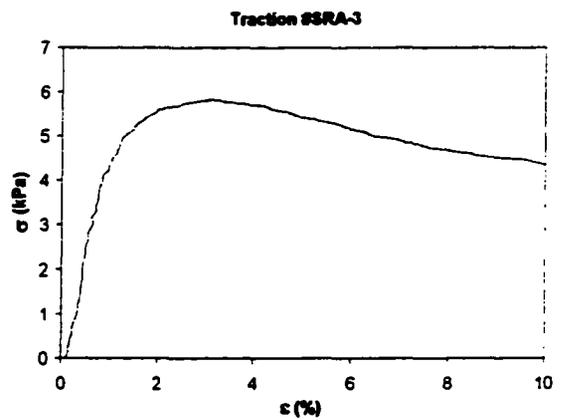
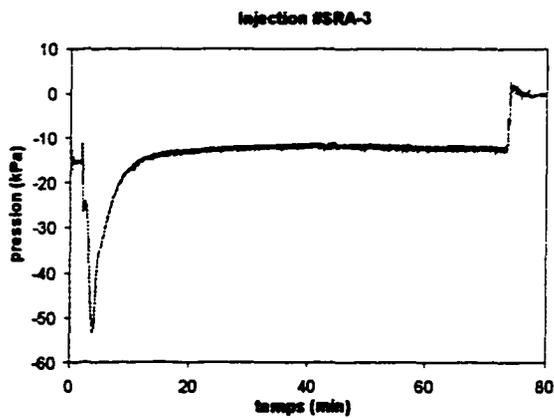
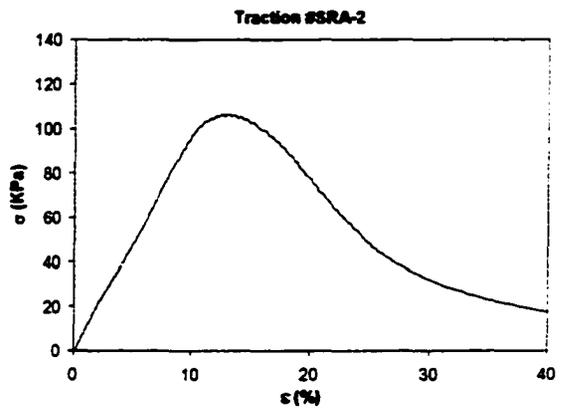
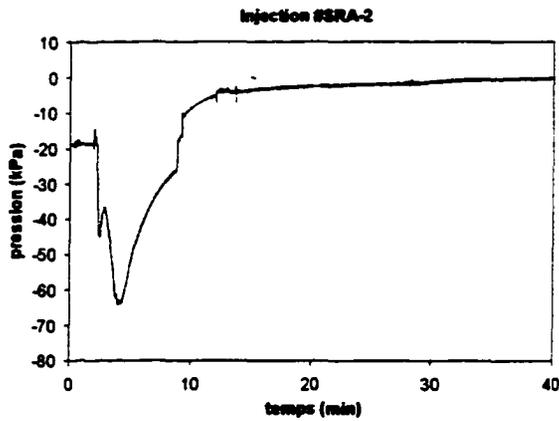
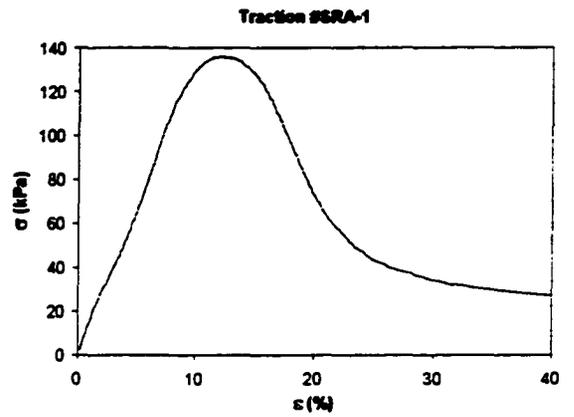
Courbes s'évolution de la pression pendant l'injection de échantillons (Pression vs temps)

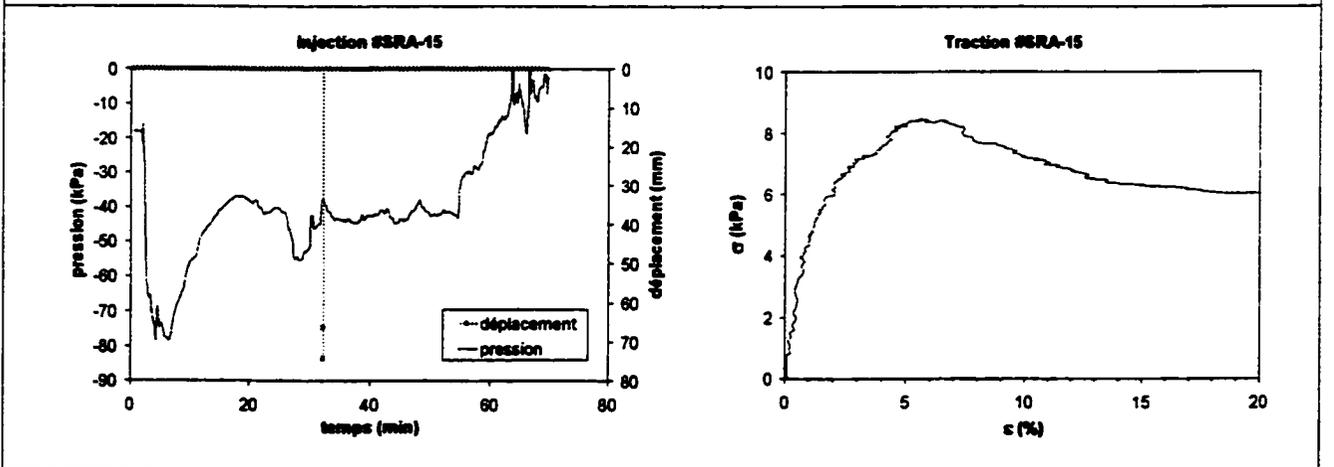
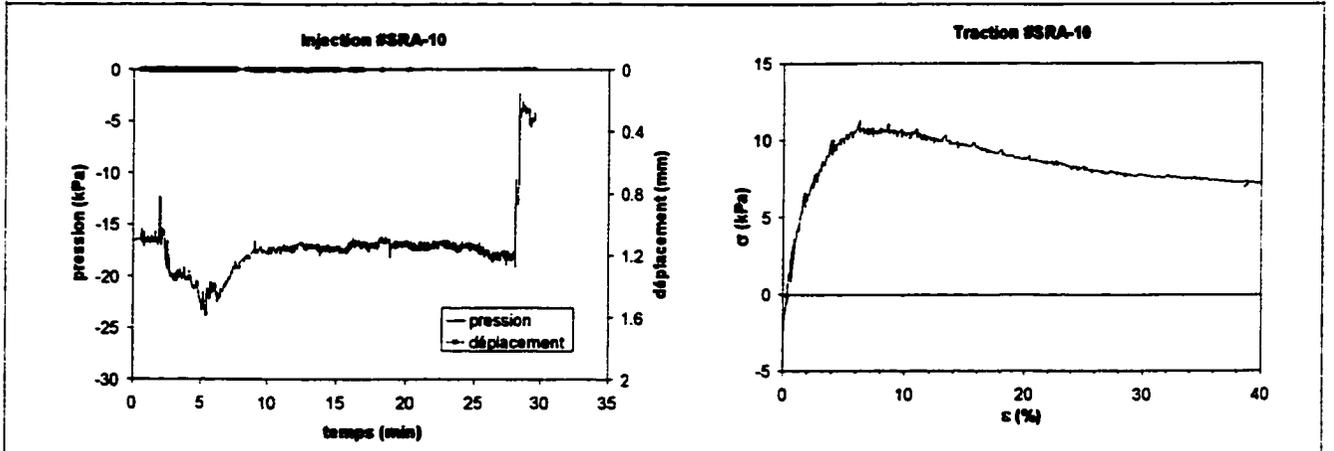
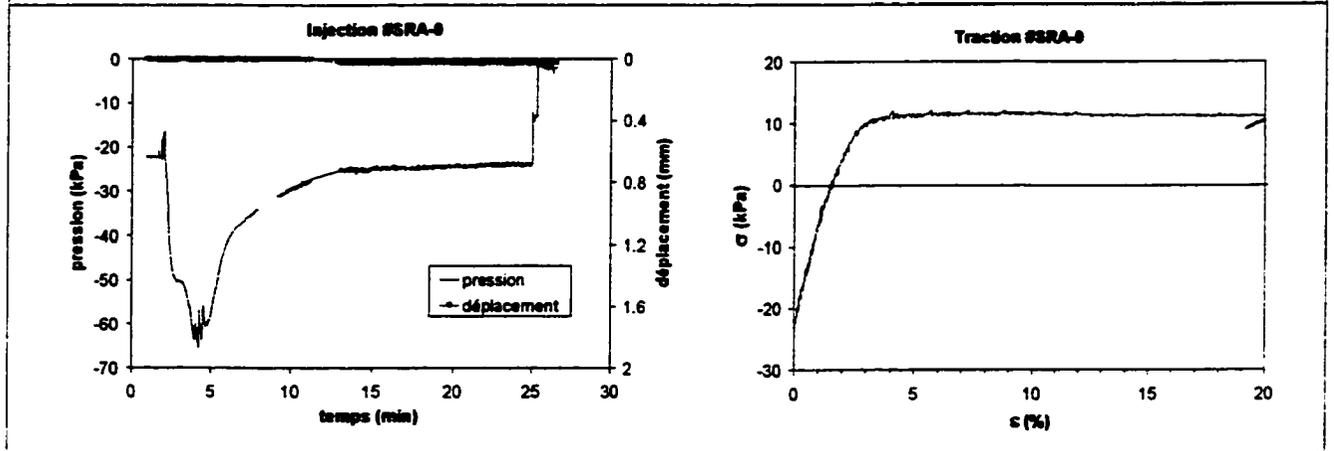
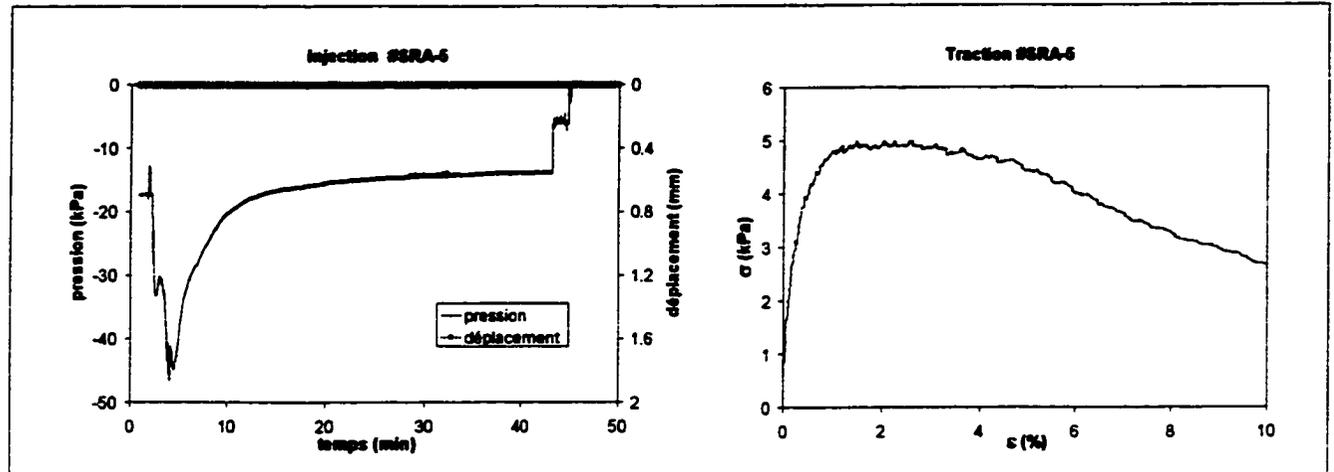
Courbes des essais cycliques (Contrainte vs déplacement)

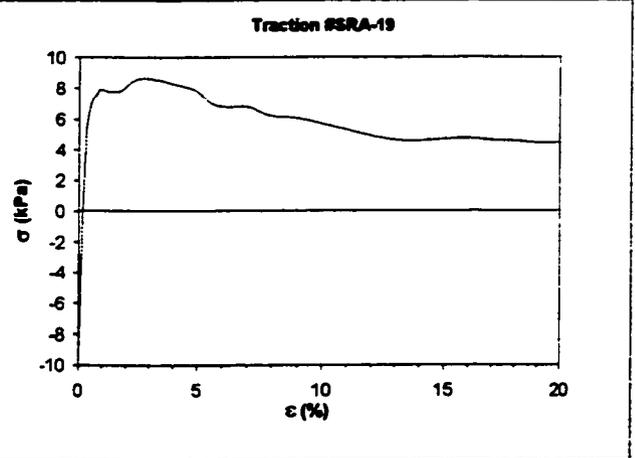
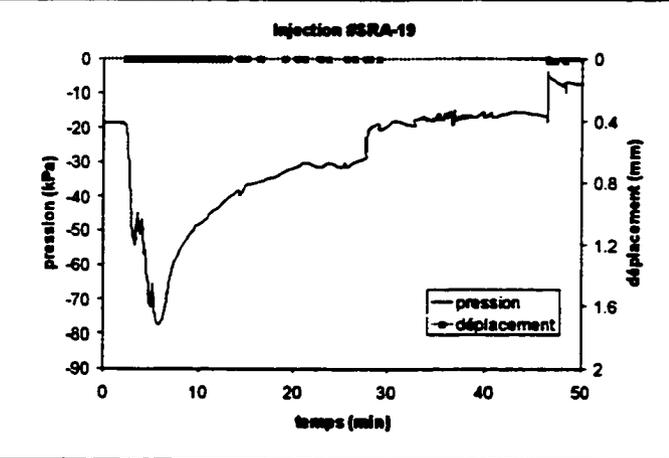
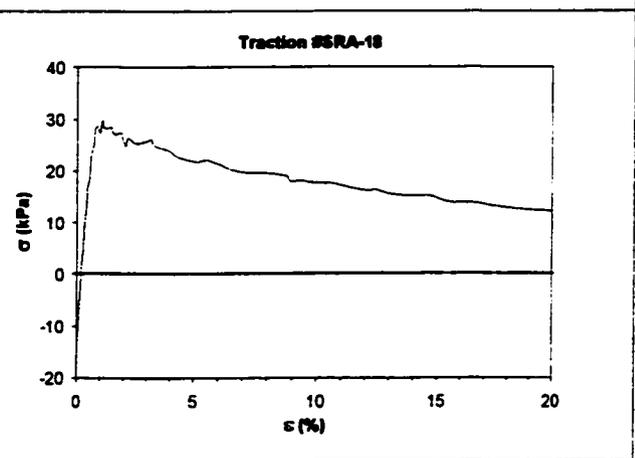
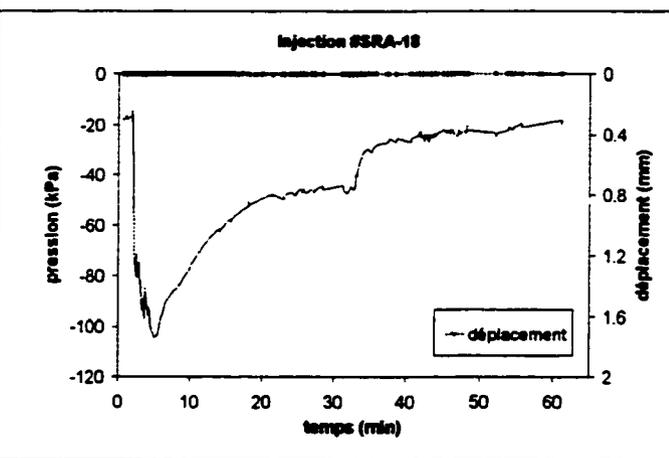
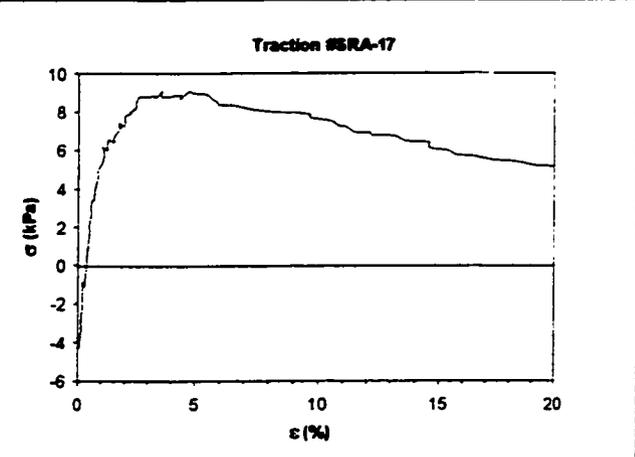
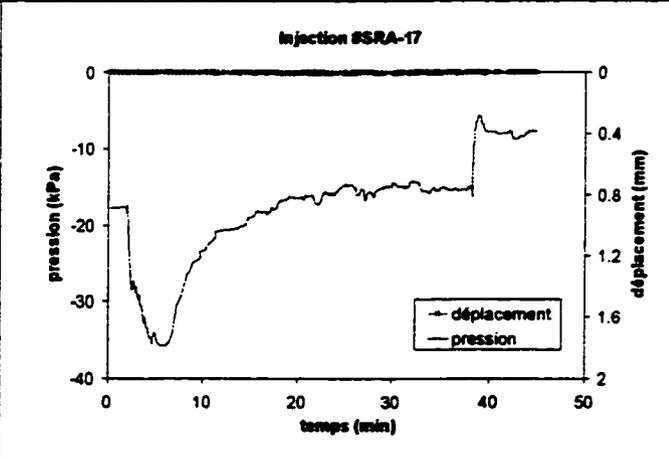
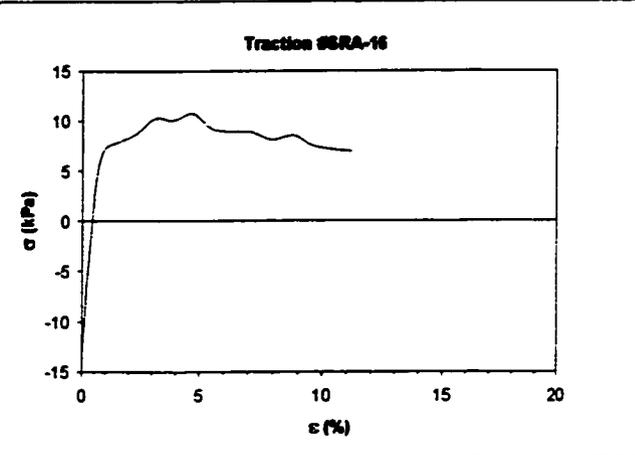
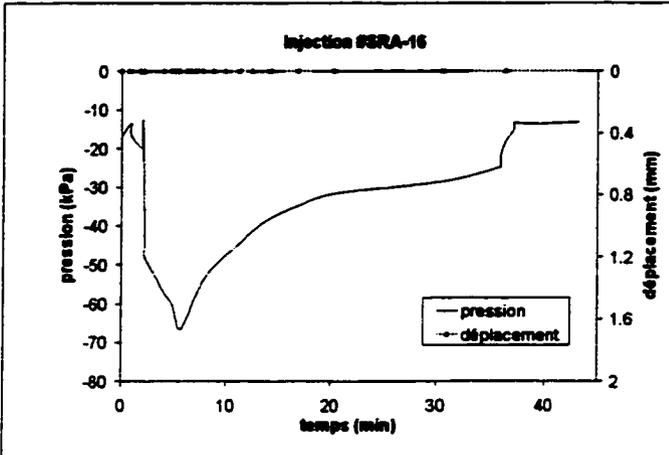
Courbes des essais de traction après l'essai cyclique (Contrainte vs déformation)

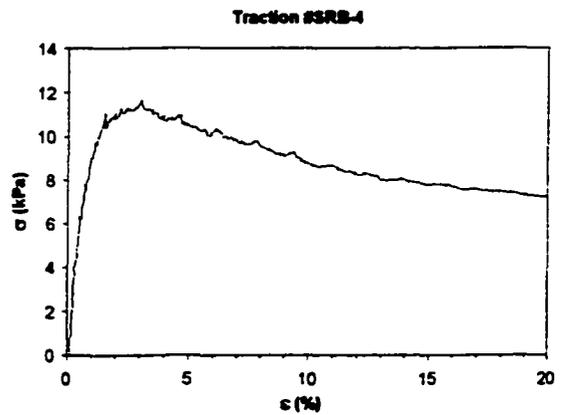
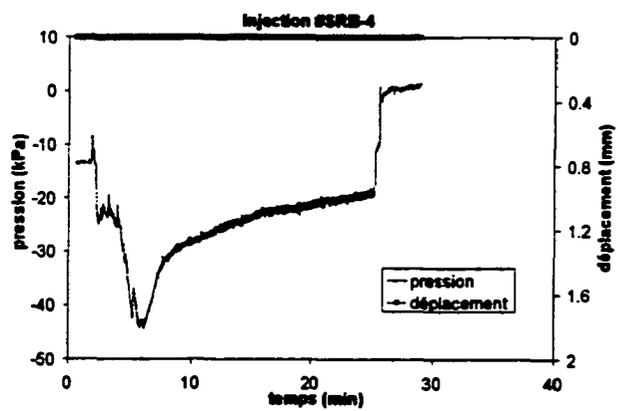
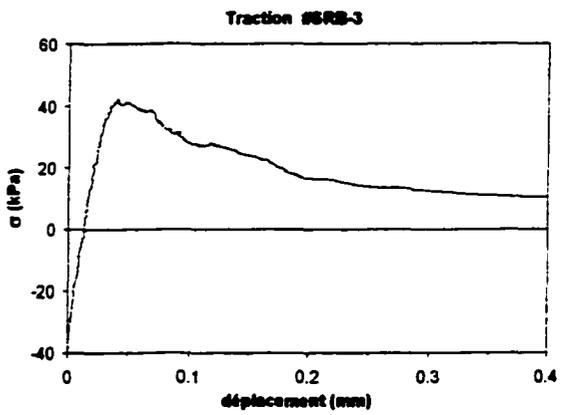
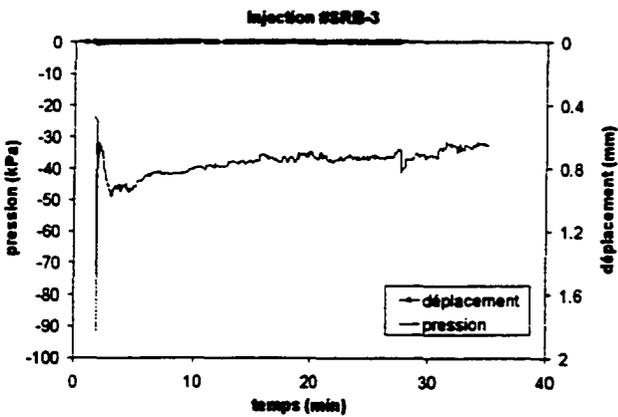
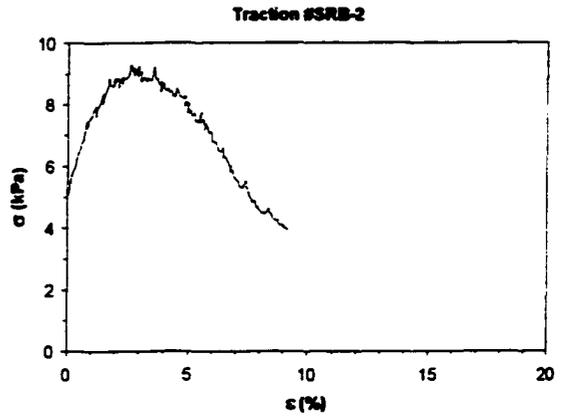
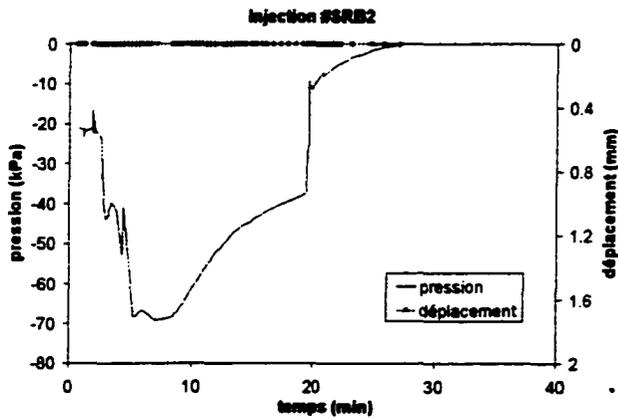
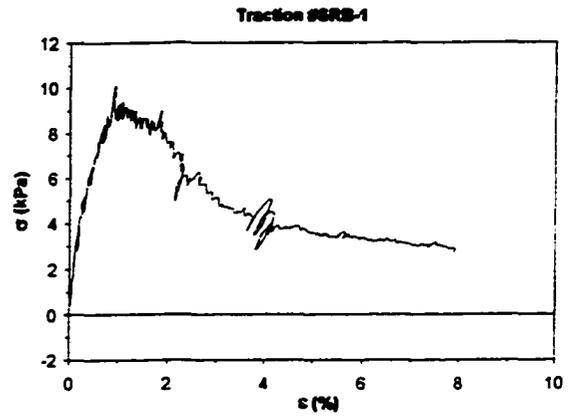
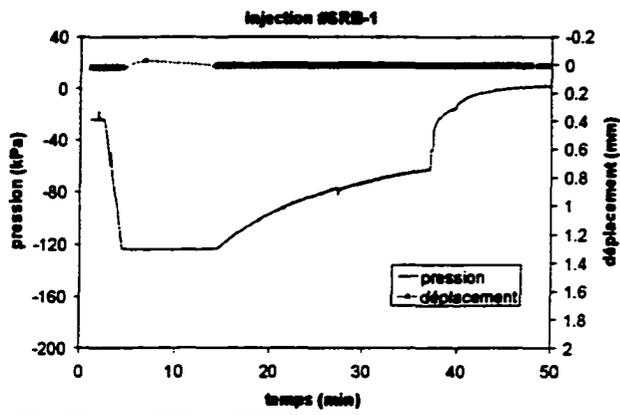
Type produit	Hydrophobe semi-rigide PF930	Hydrophobe semi-rigide H100	Hydrophobe flexible F 1000	Hydrophile 900 LVSF
Nombre d'essais	6	6	1	8
N° Échantillon	SRA7 SRA8 SRA11 SRA12 SRA13 SRA14	SRB6 SRB7 SRB8 SRB14 SRB15 SRB16	F3	Hi5 Hi7 Hi8 Hi9 Hi10 Hi15 Hi16 Hi17

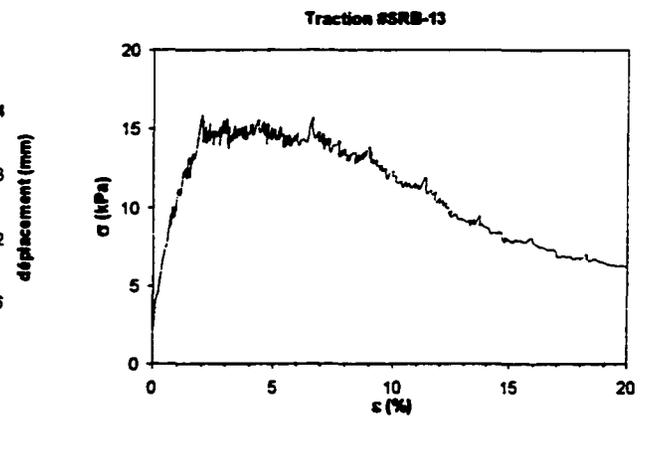
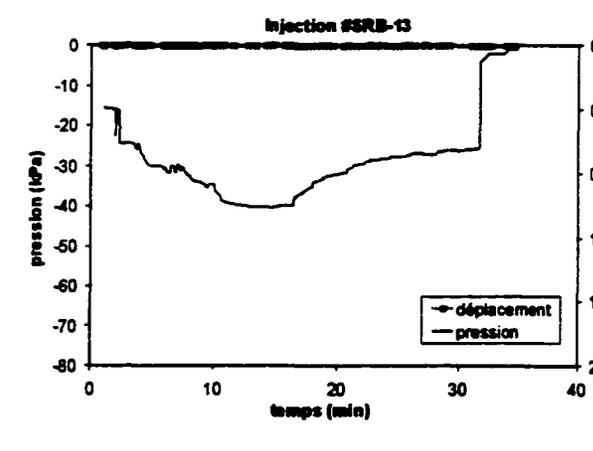
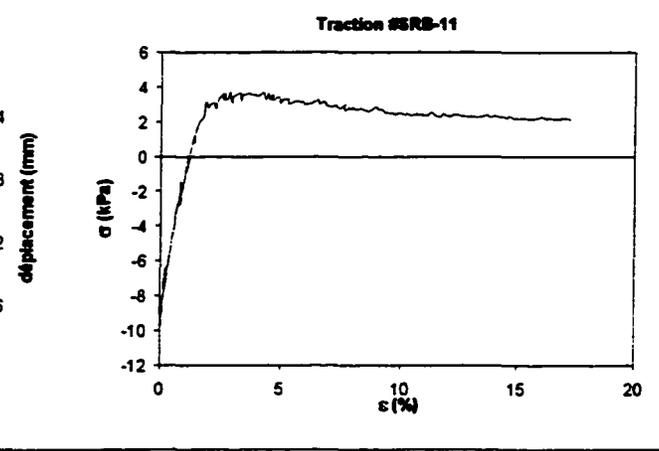
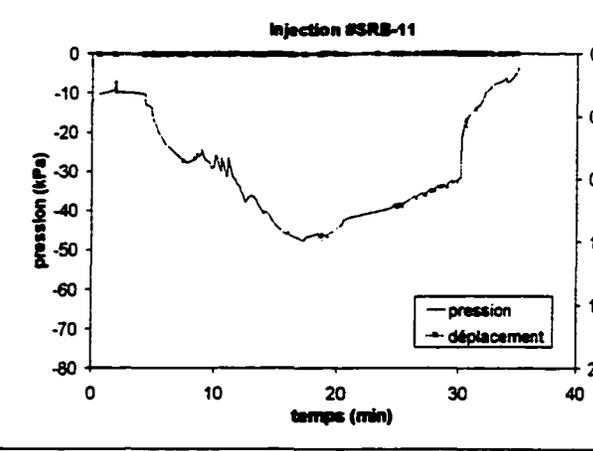
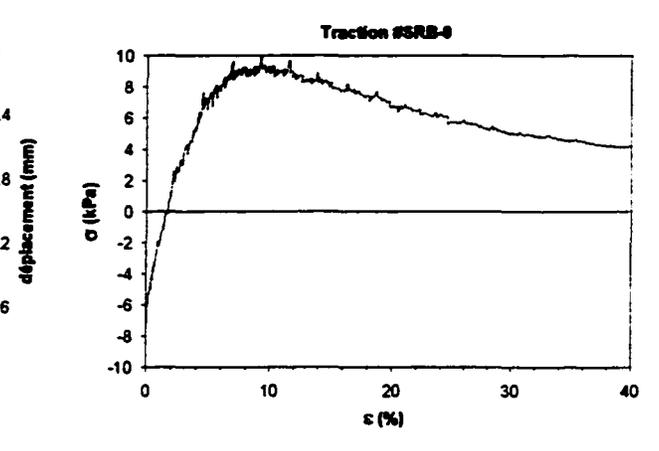
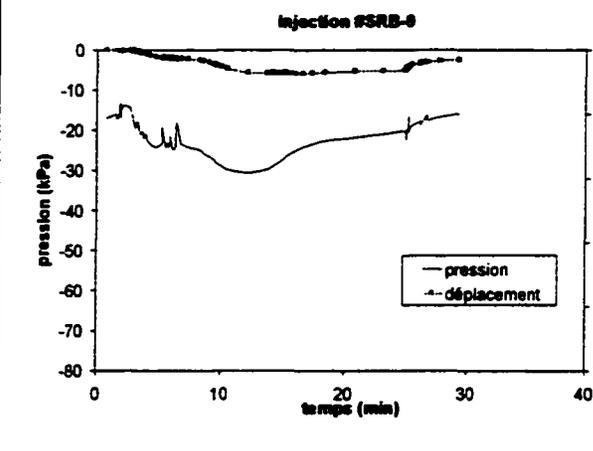
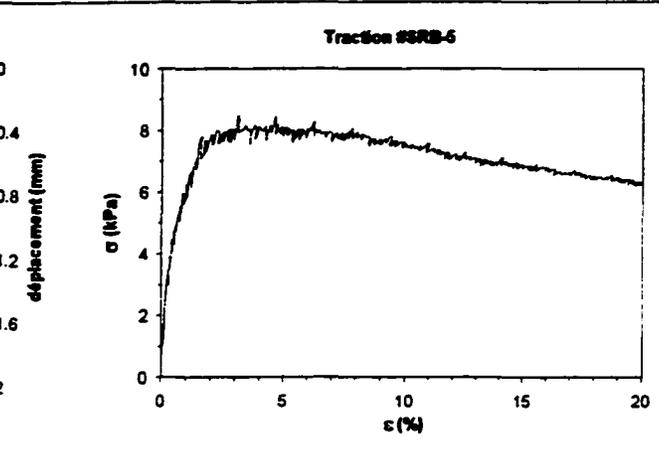
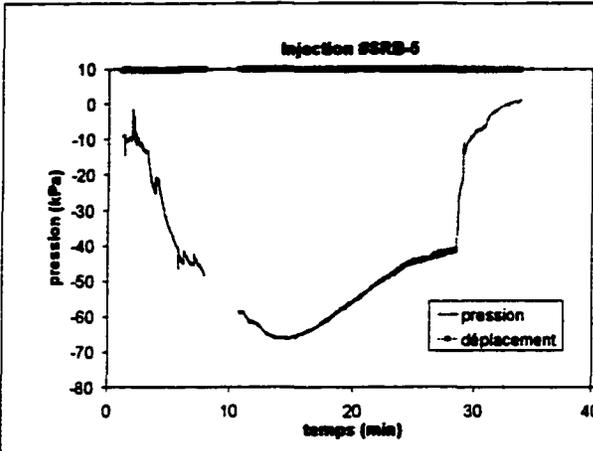
SRA-1 : Aucune donnée n'a été enregistrée pendant l'injection

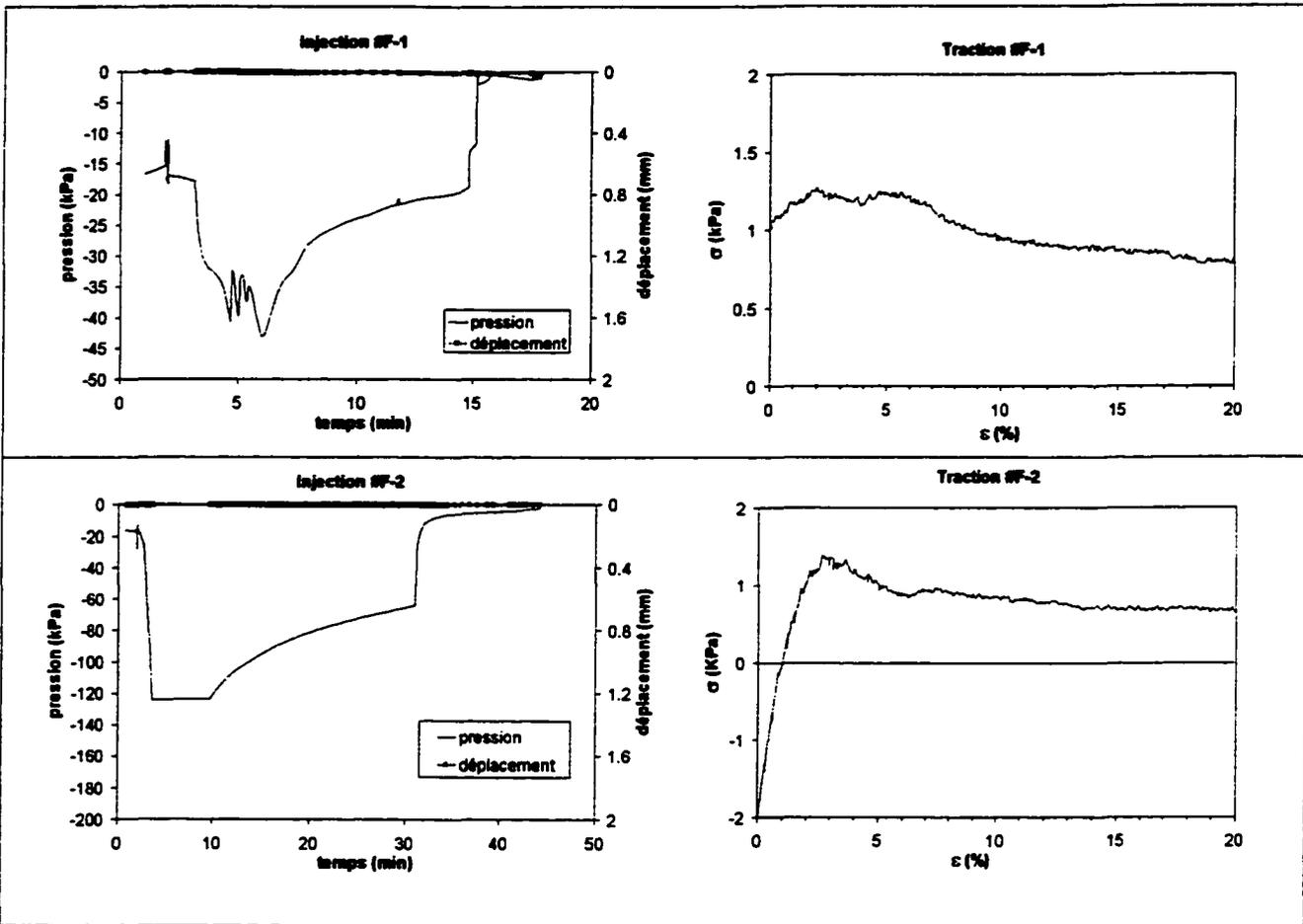


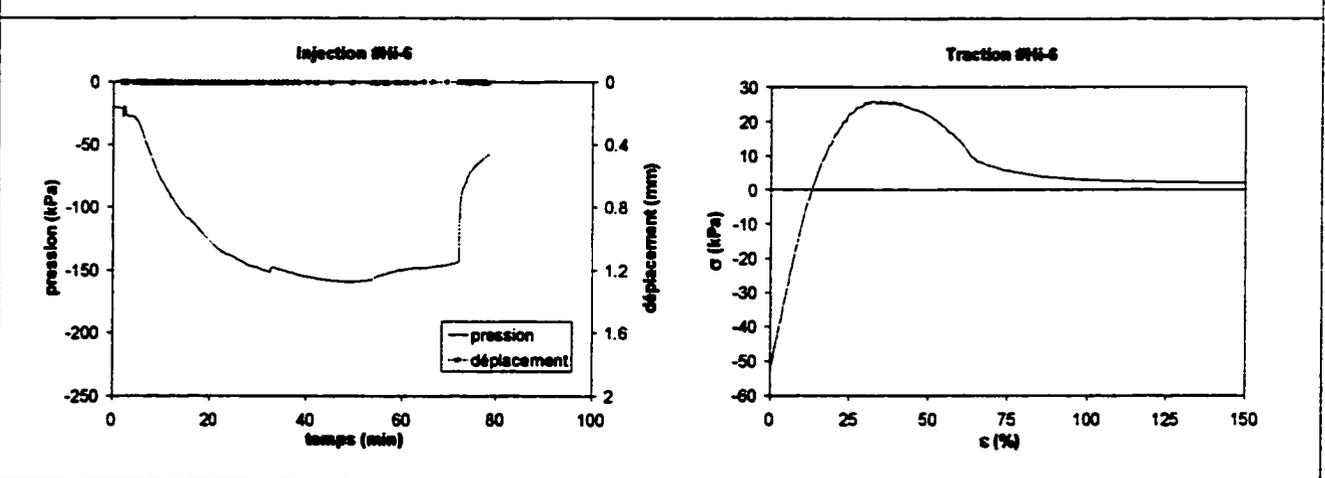
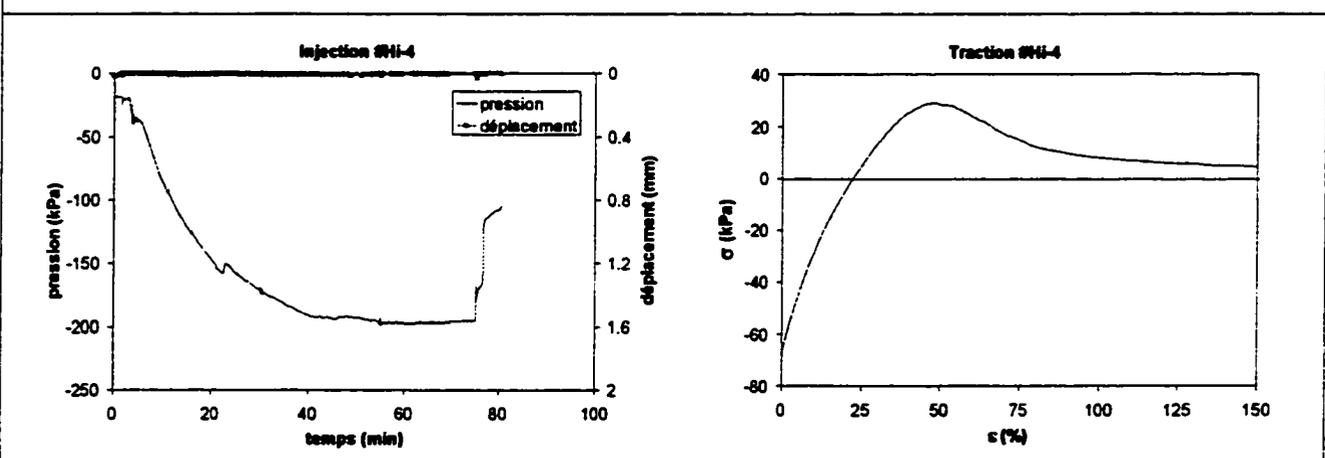
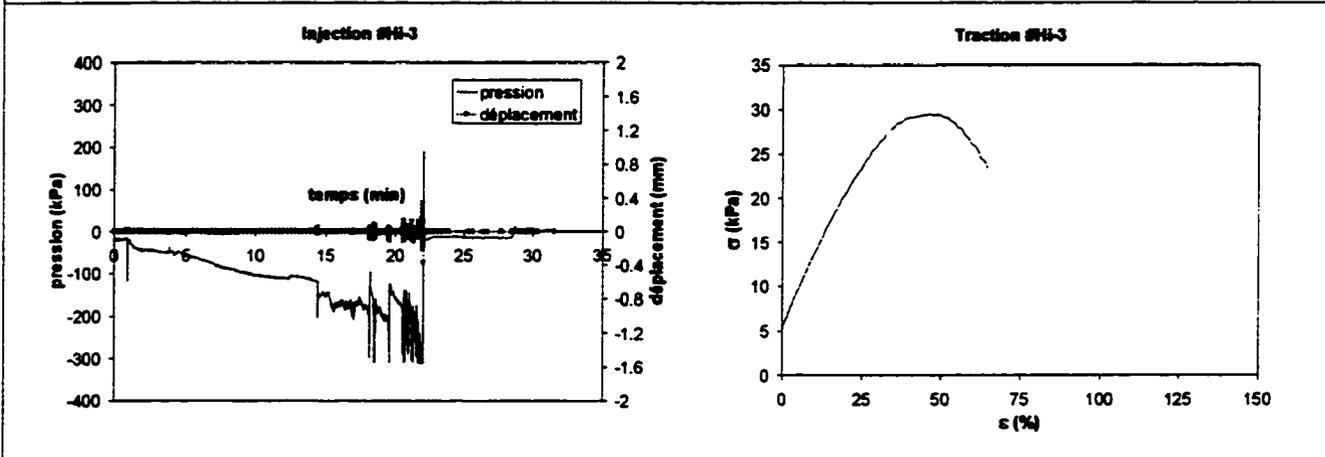
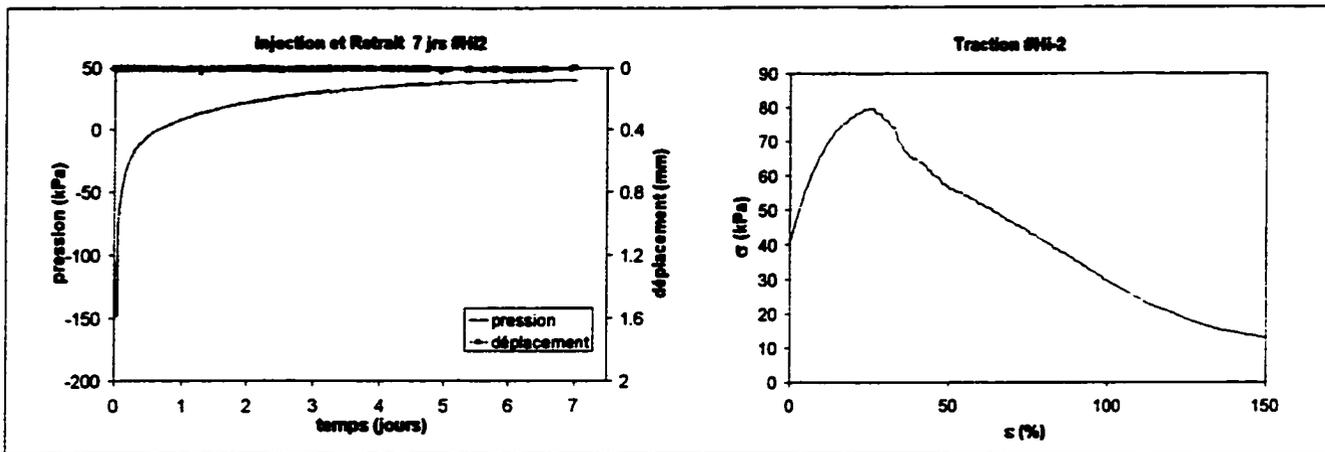


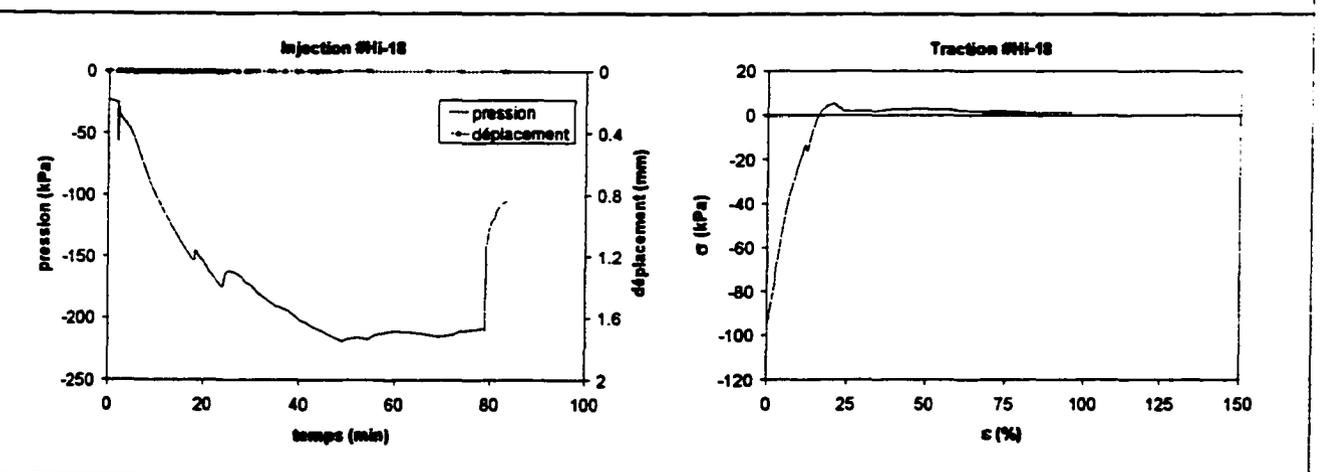
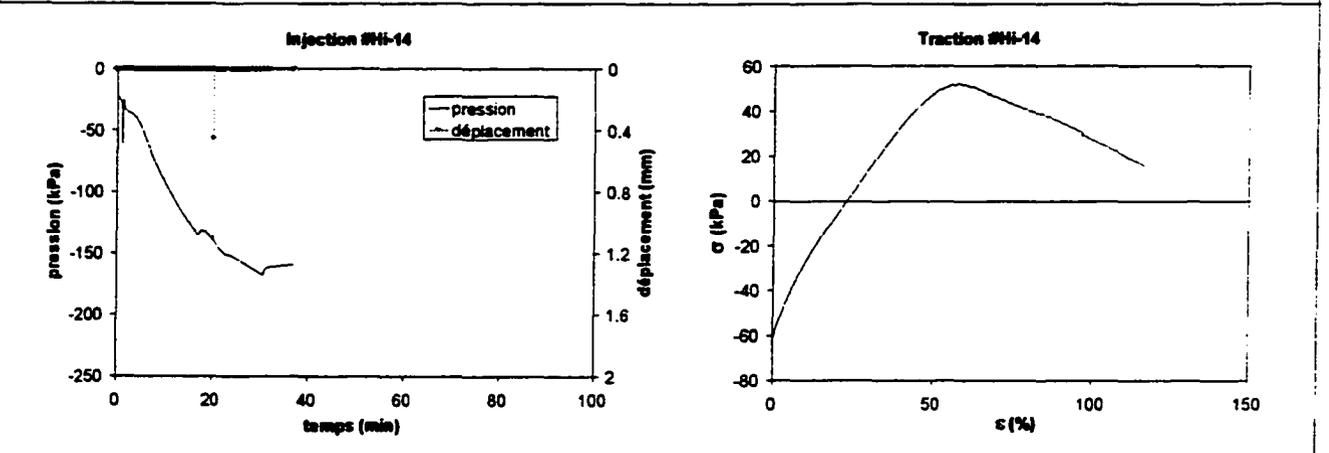
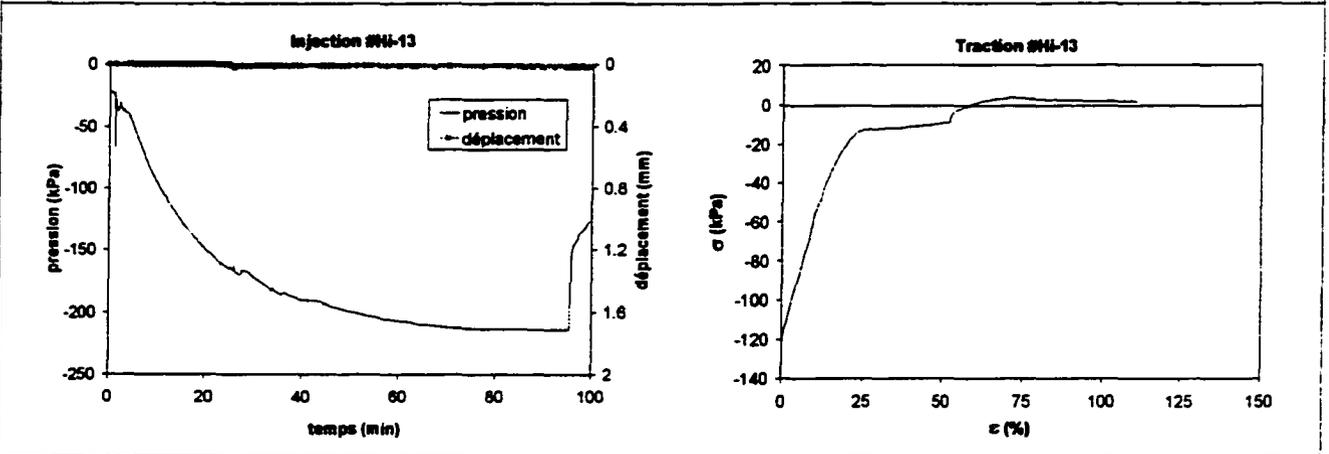
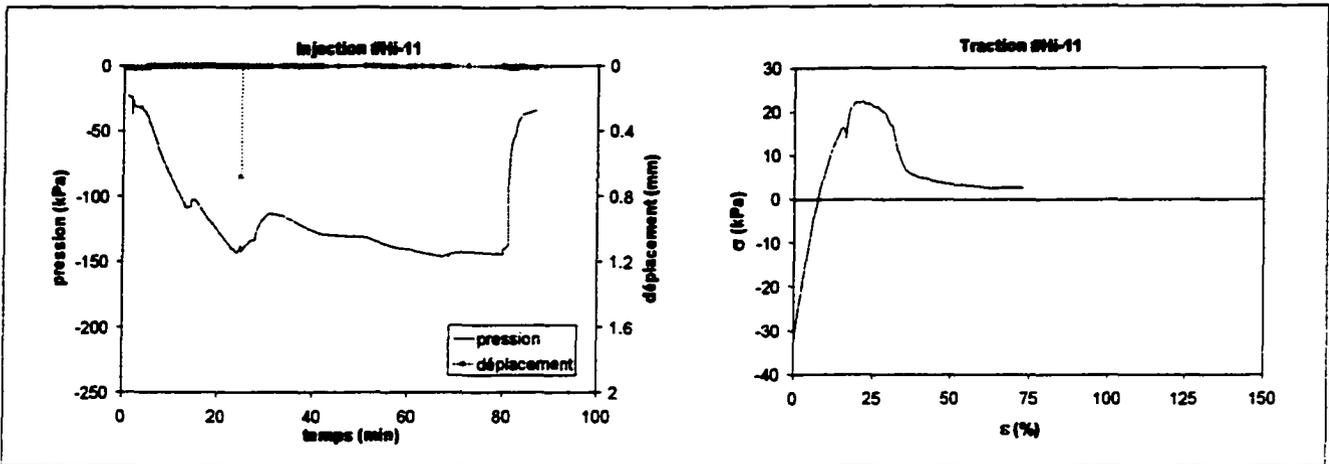


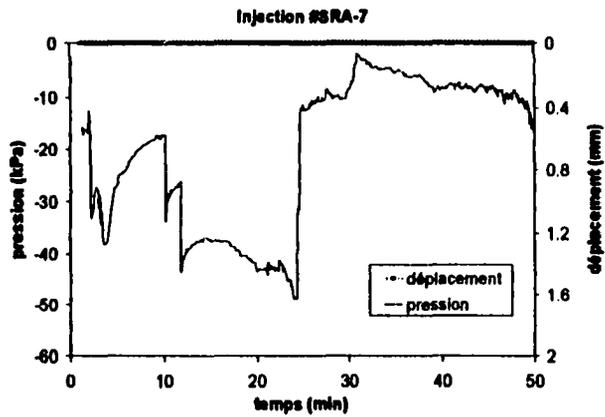






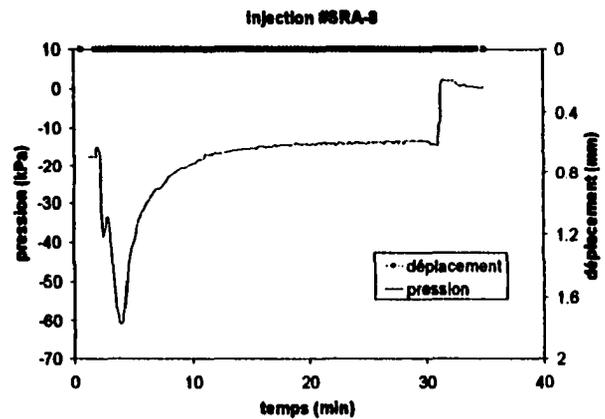




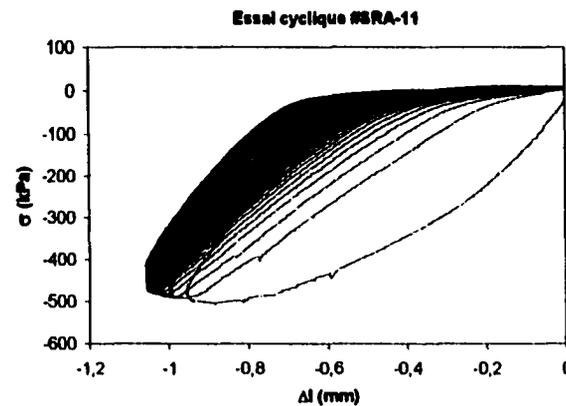
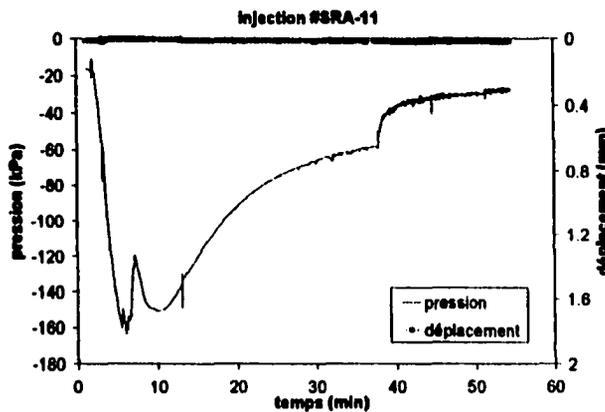
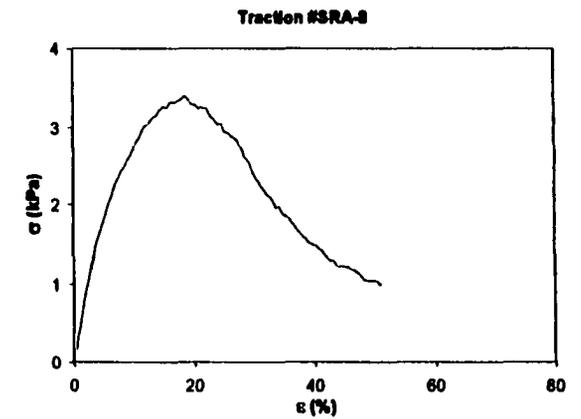


SRA-7 : pas d'enregistrement pendant l'essai cyclique (essai de réglage)

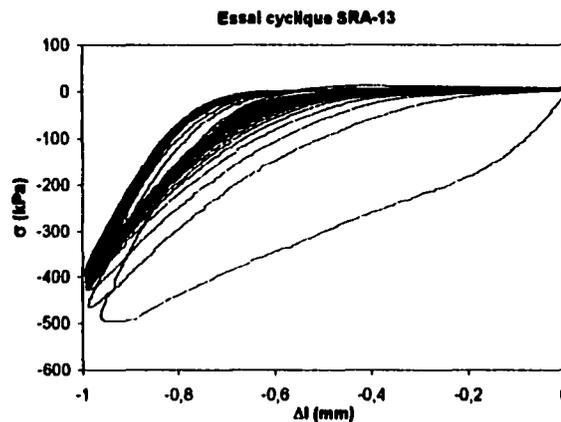
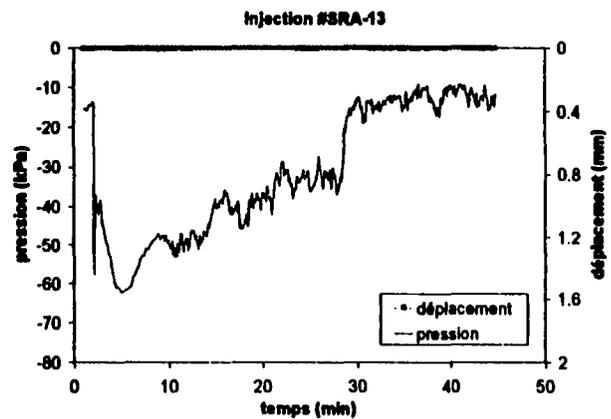
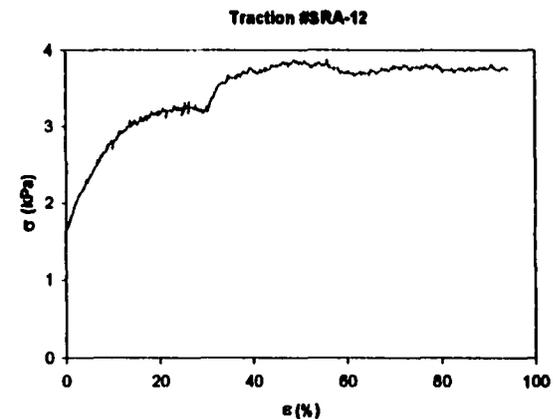
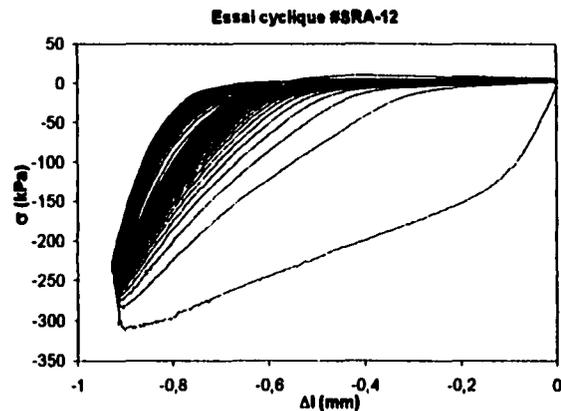
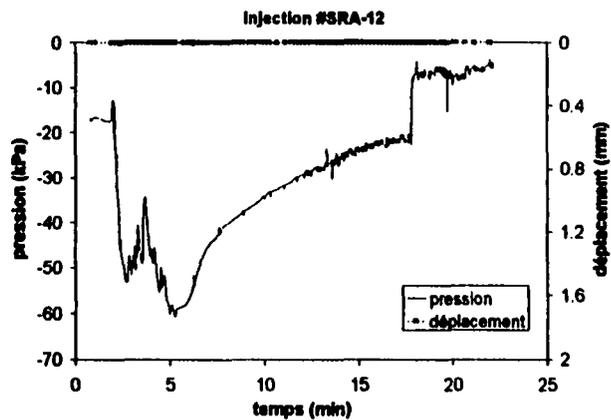
SRA-7 : pas d'essai de traction (rupture de l'échantillon après l'essai cyclique)



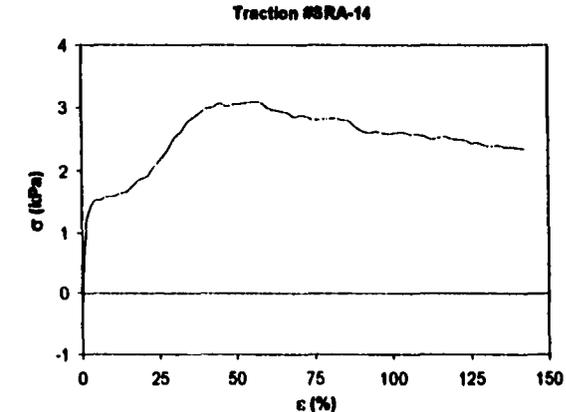
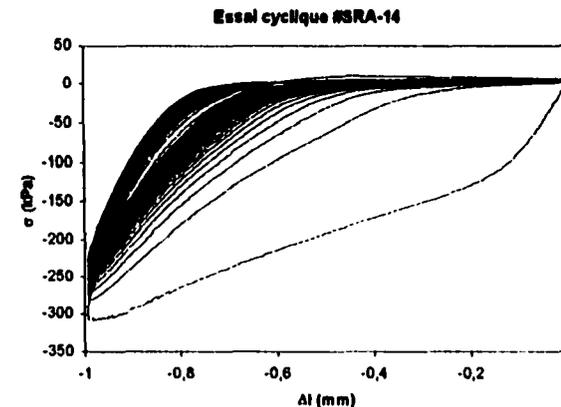
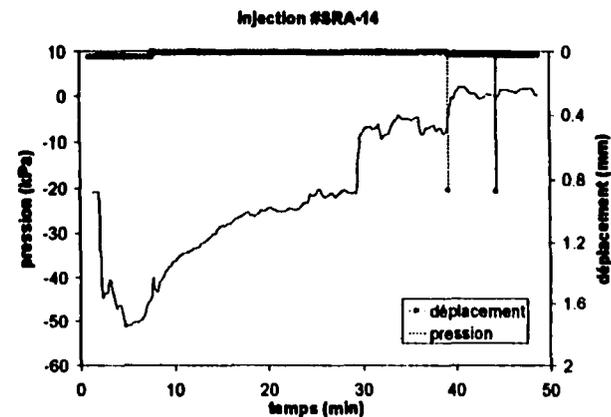
SRA-8 : pas d'enregistrement pendant l'essai cyclique (essai de réglage)

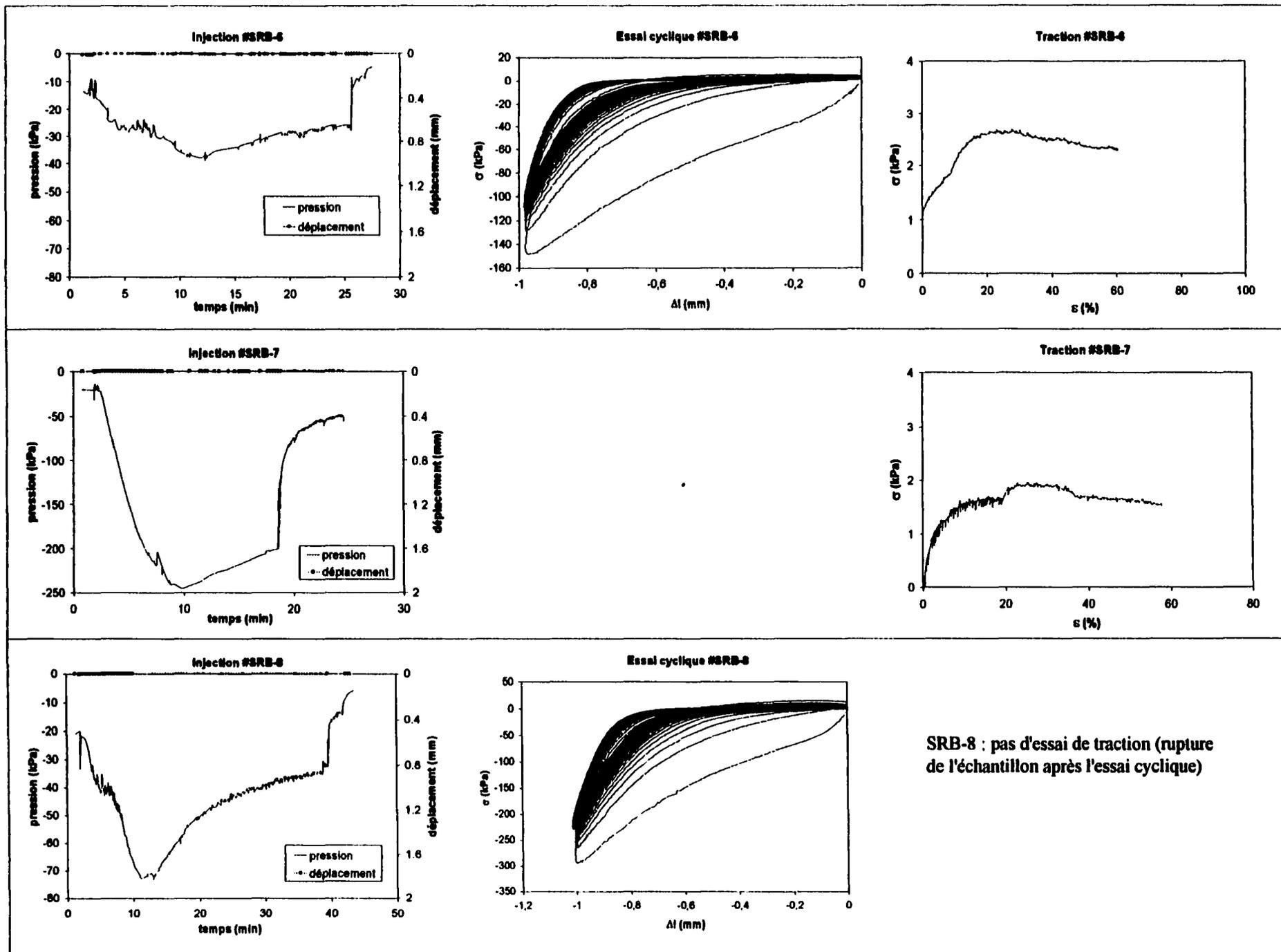


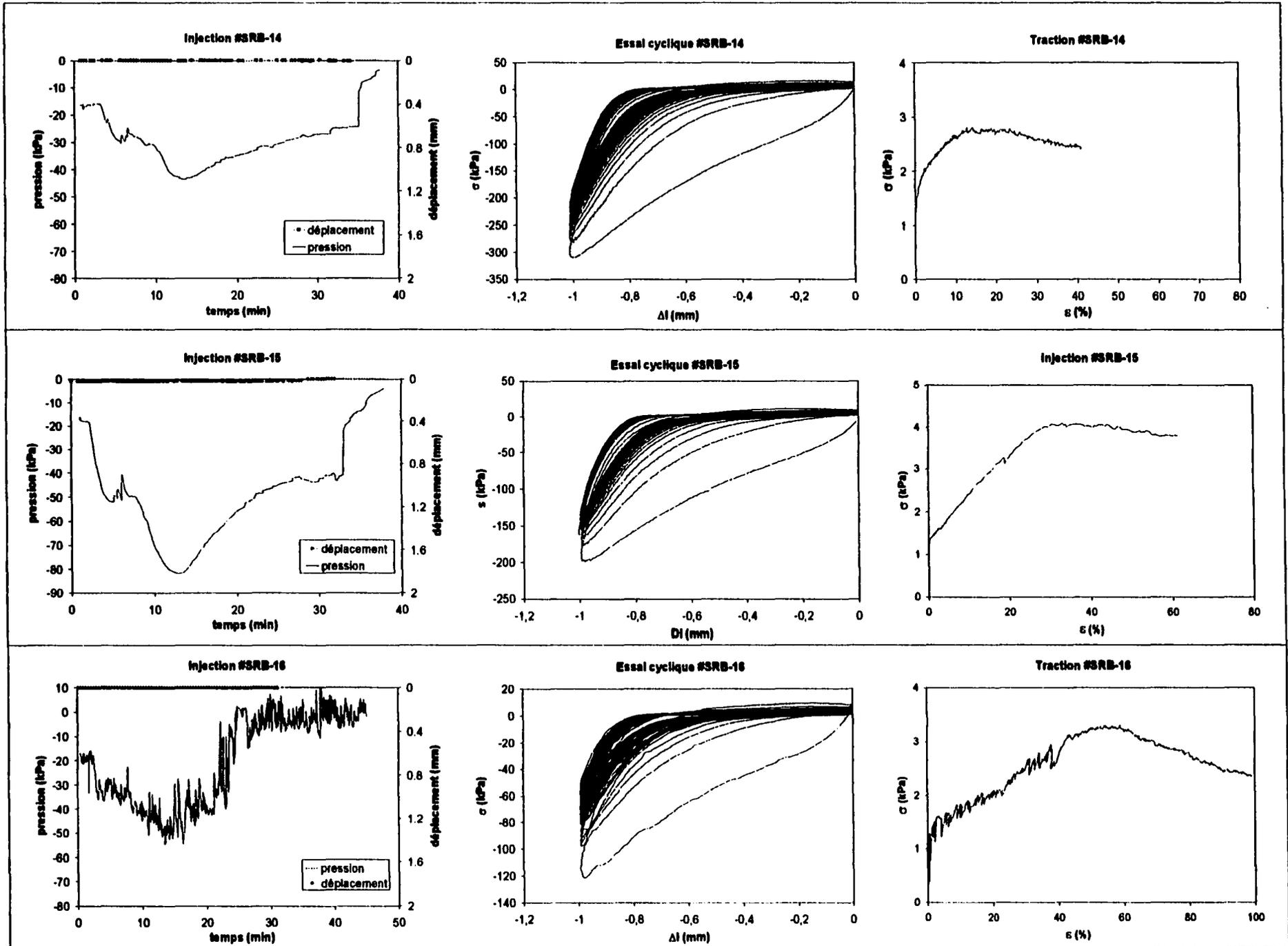
SRA-11 : pas d'essai de traction (rupture de l'échantillon après l'essai cyclique)

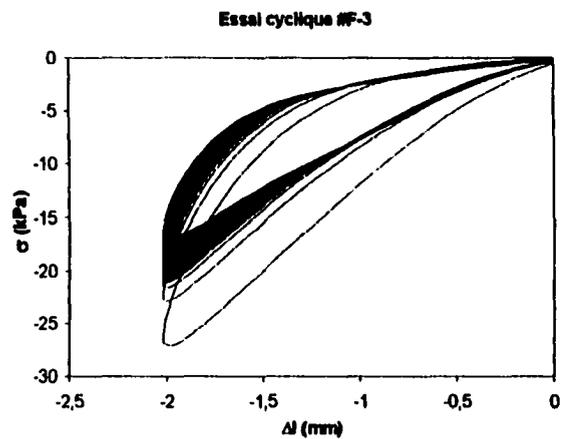
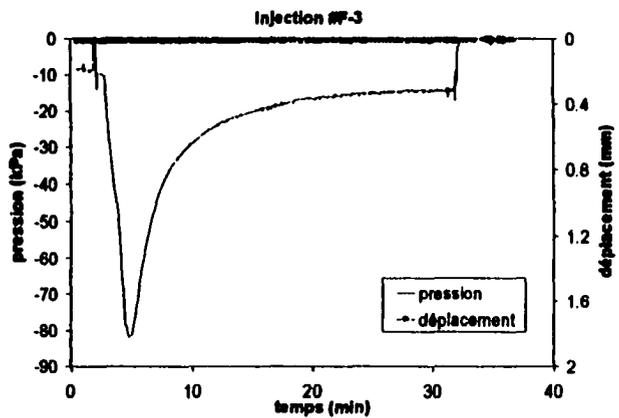


SRA-13 : pas d'essai de traction (rupture de l'échantillon après l'essai cyclique)

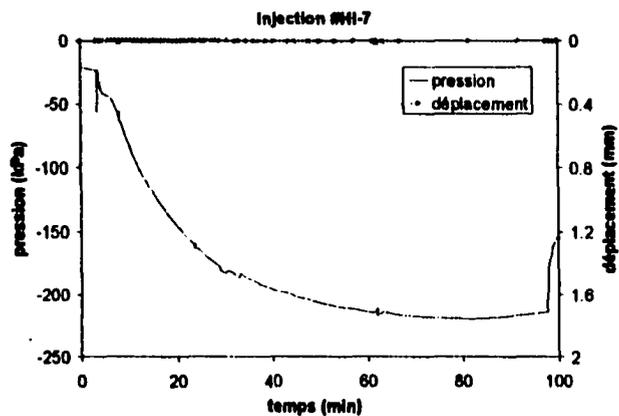
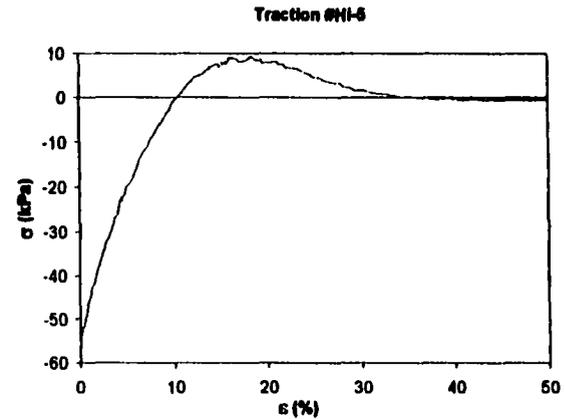
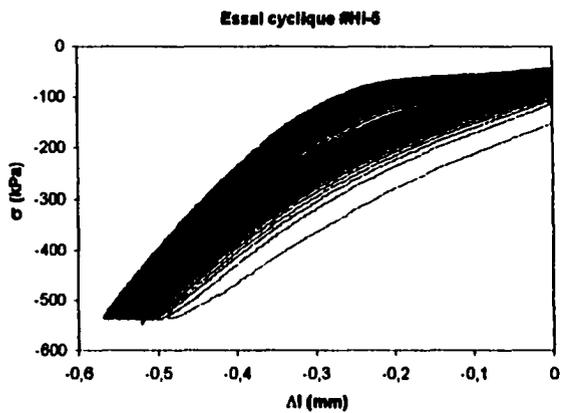
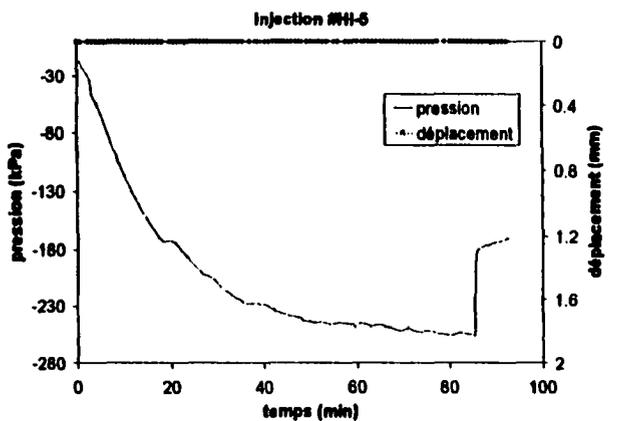




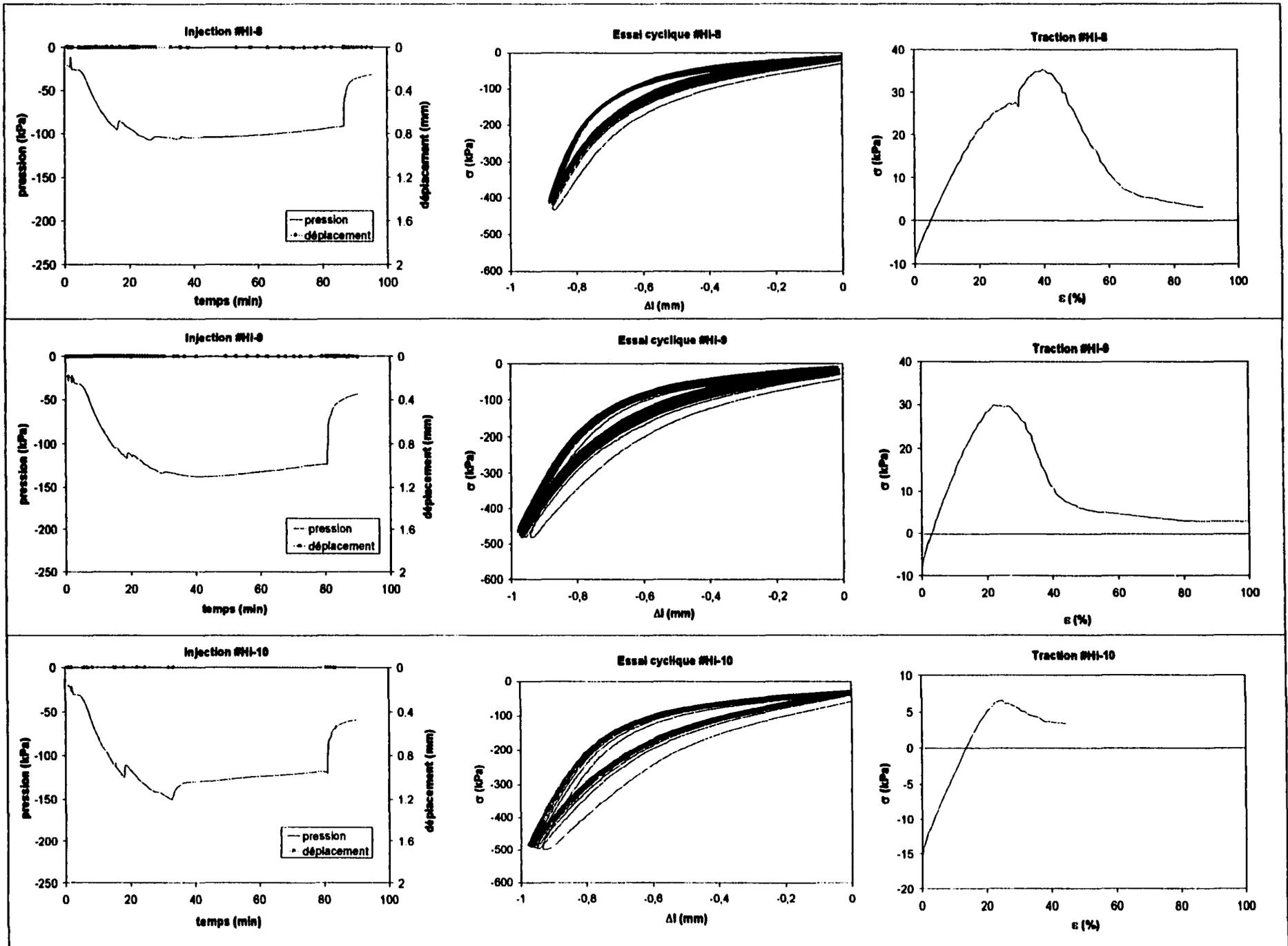


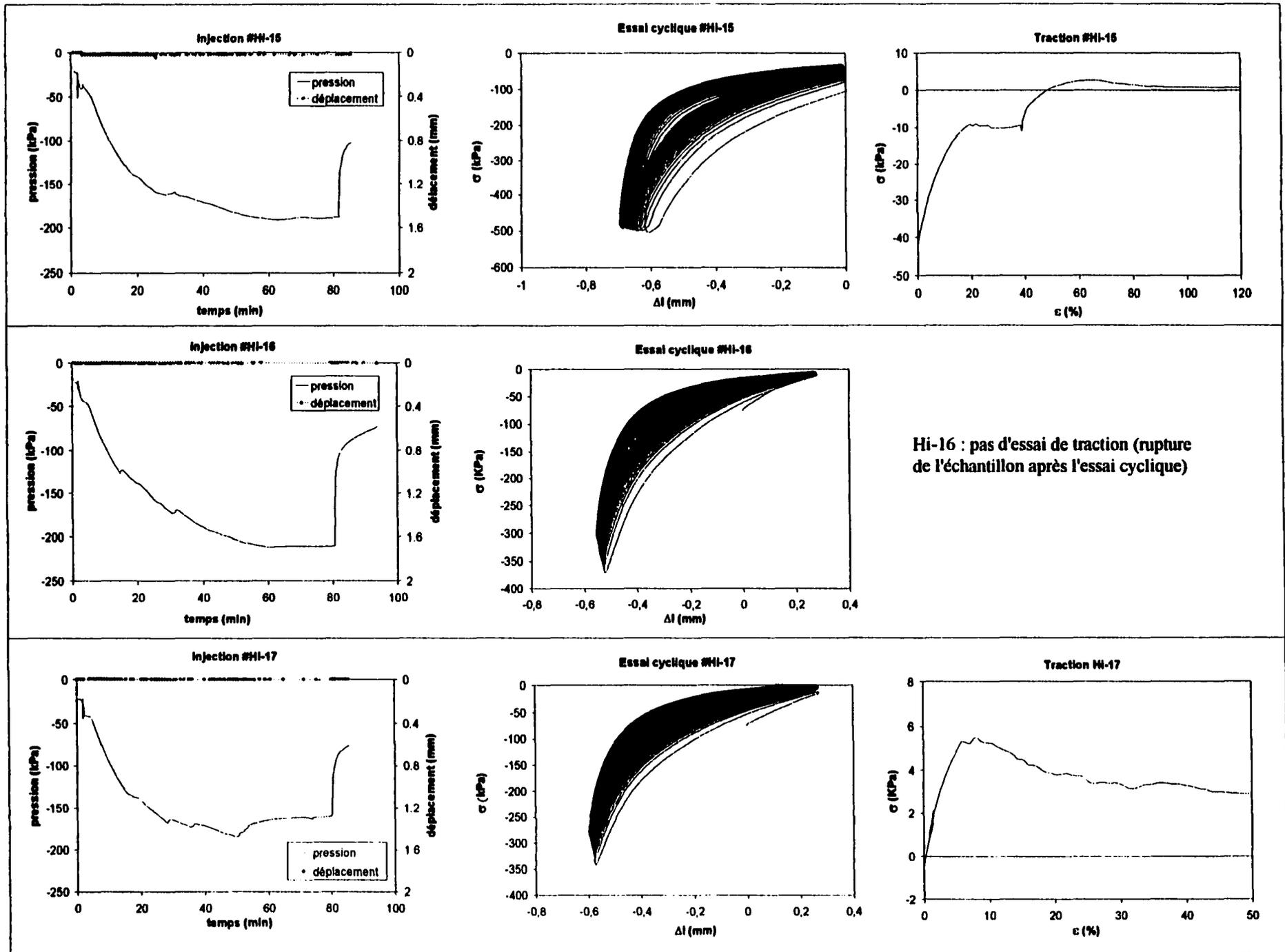


F-3 : pas d'essai de traction (rupture de l'échantillon après l'essai cyclique)



Hi-7 : pas d'essai cyclique ni d'essai de traction (rupture de l'échantillon après l'injection)





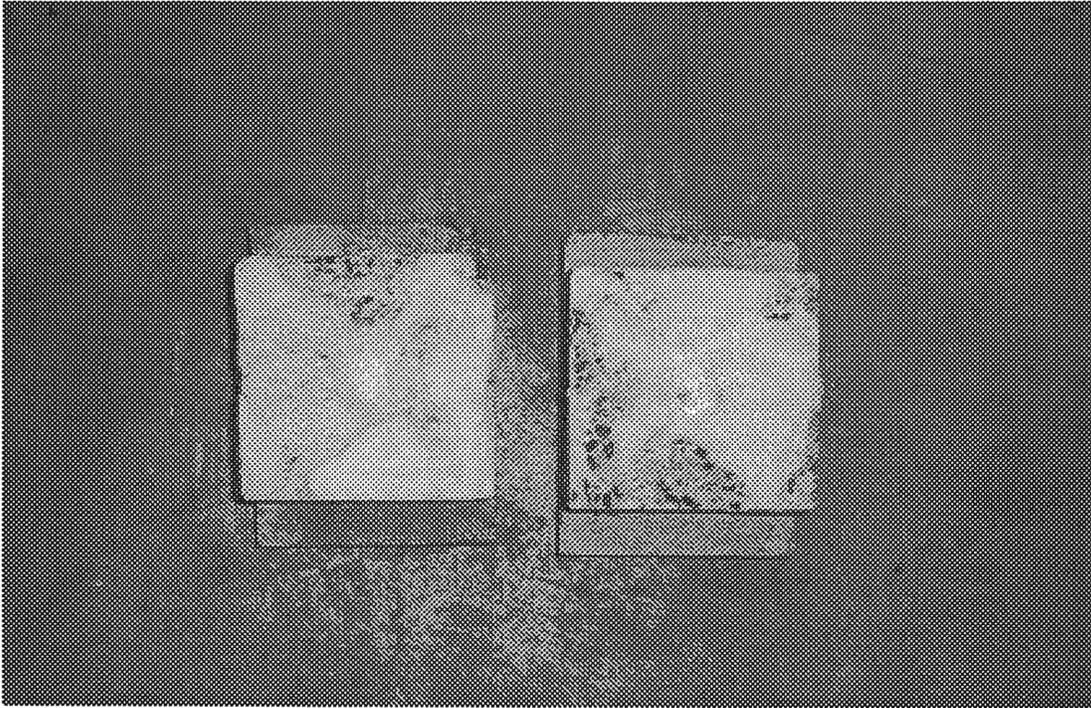


Photo C1 : Échantillon hydrophobe sec après rupture en traction ($e=5\text{mm}$) – SRA2

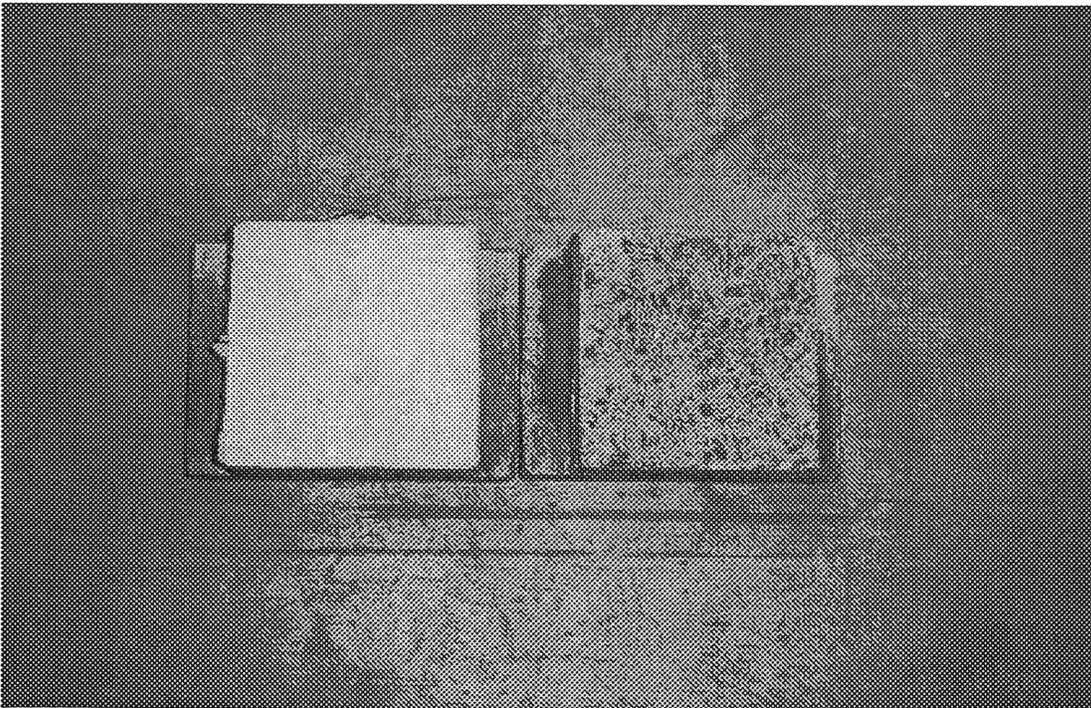


Photo C2 : Échantillon hydrophobe humide après rupture en traction ($e=5\text{mm}$) - SRA4

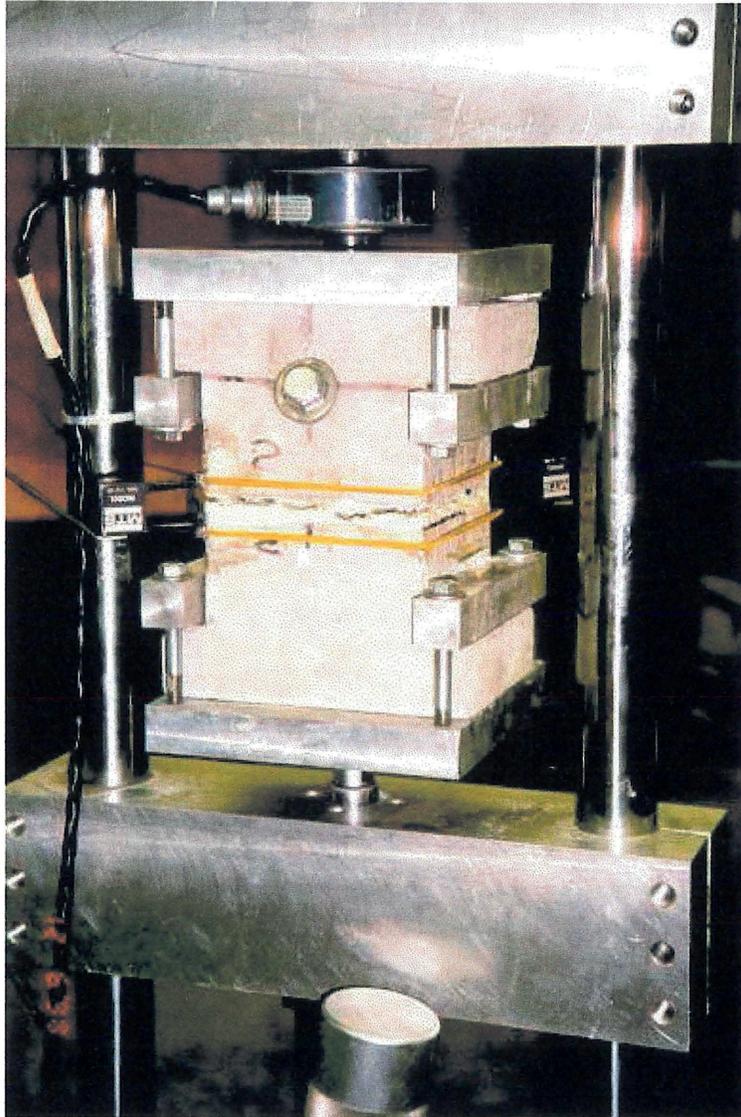


Photo C3 : Échantillon hydrophobe sec après rupture en traction ($e=5\text{mm}$) – SRA2
(rupture cohésive)

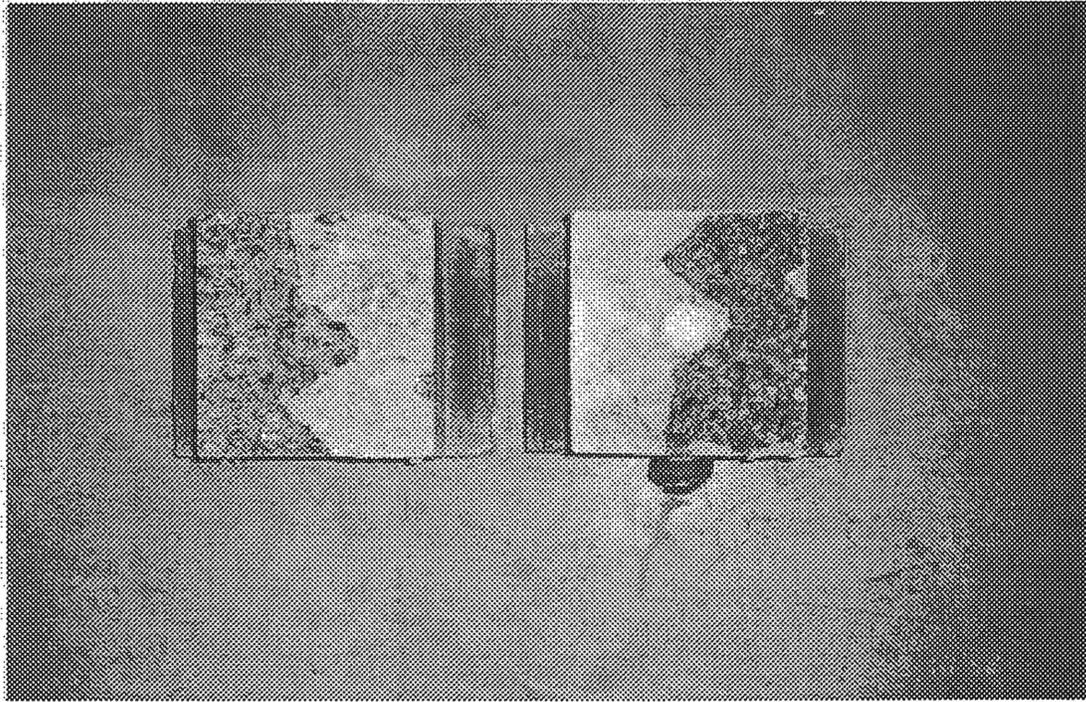


Photo C4 : Échantillon hydrophobe humide après rupture en traction ($e=2\text{mm}$)

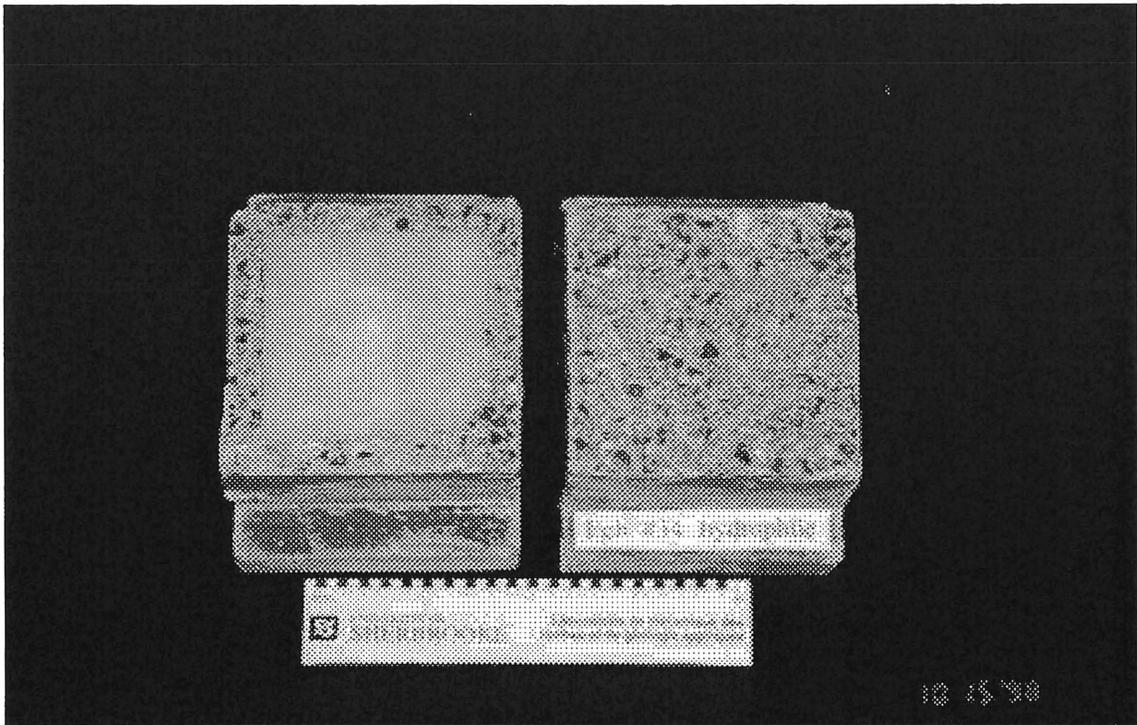


Photo C5 : Échantillon hydrophile Hi1 après l'essai de retrait

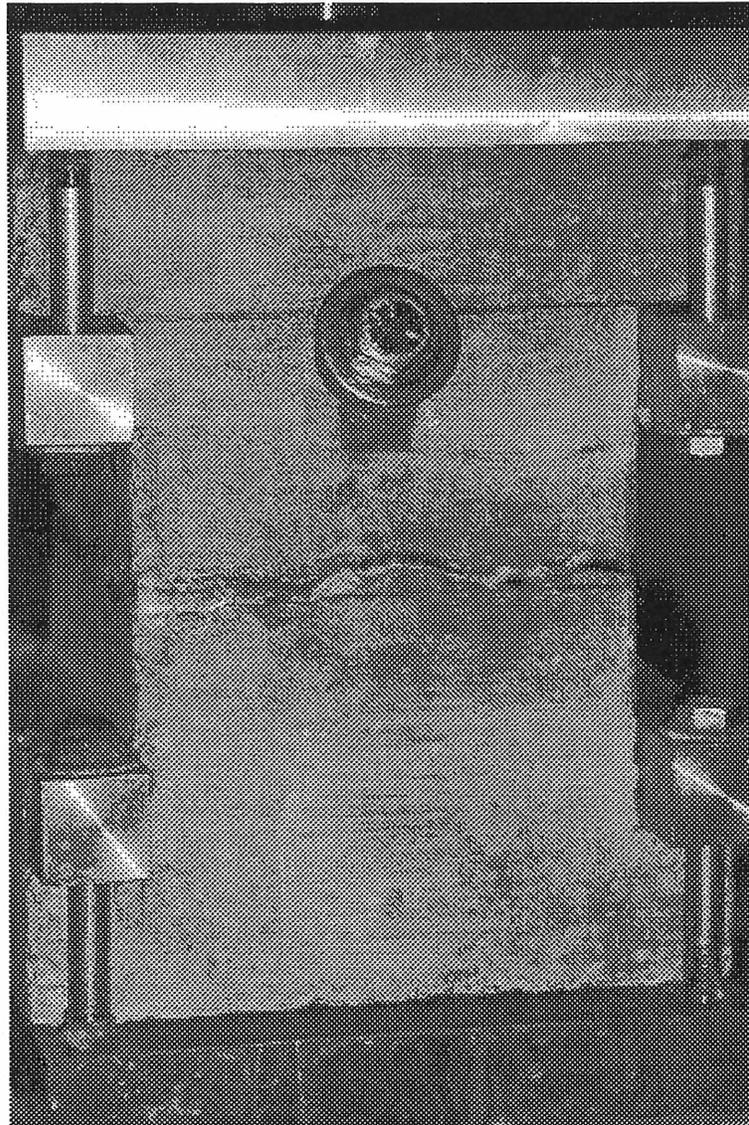


Photo C6 : Rupture en traction d'un échantillon hydrophile

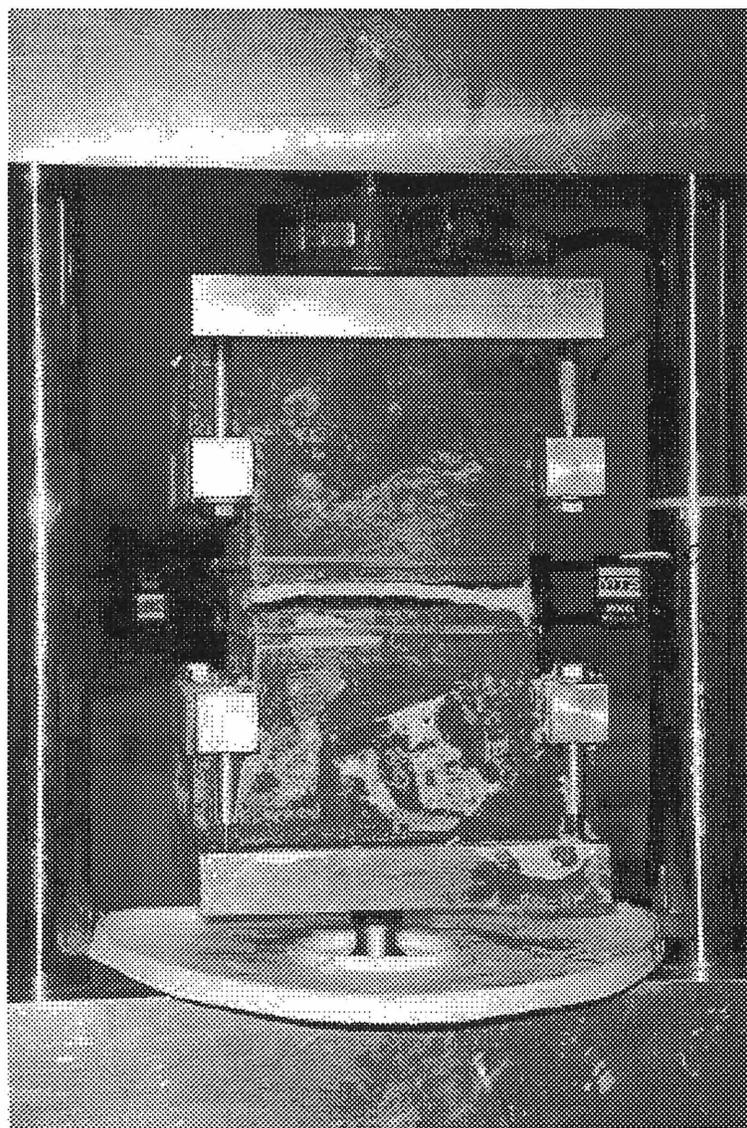
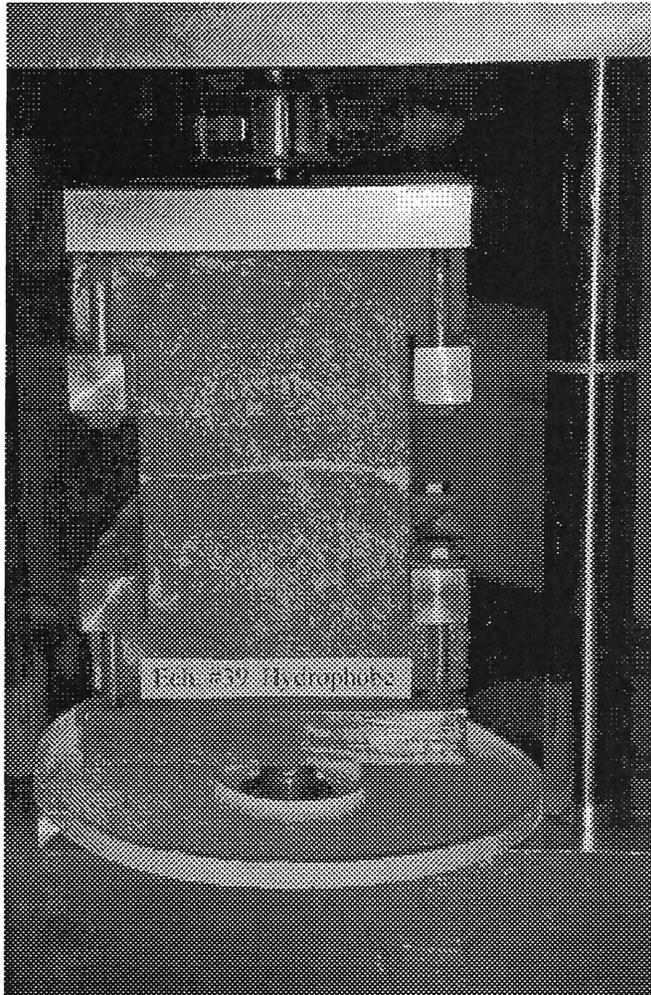


Photo C7: Échantillon hydrophobe après l'essai de traction (fissure $e=5$ mm)



PhotoC9: Échantillon PF930 après l'injection (fissure $e=2$ mm)

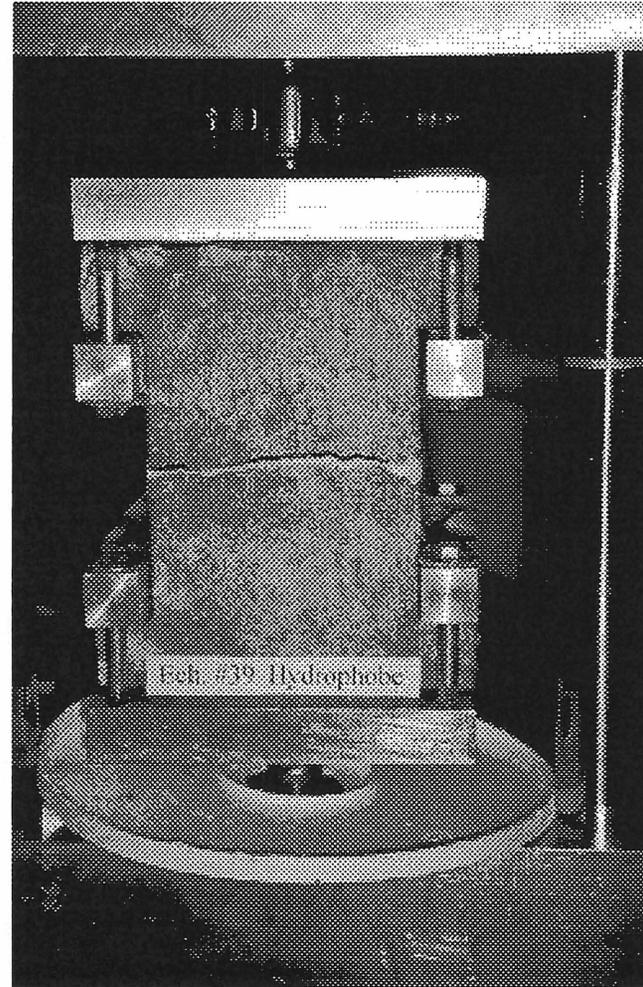


Photo C10 : Échantillon PF930 après l'essai de traction (fissure $e=2$ mm)

ANNEXE D :
Plans des Tunnel Louis-H.-Lafontaine et Tunnel Ville-Marie

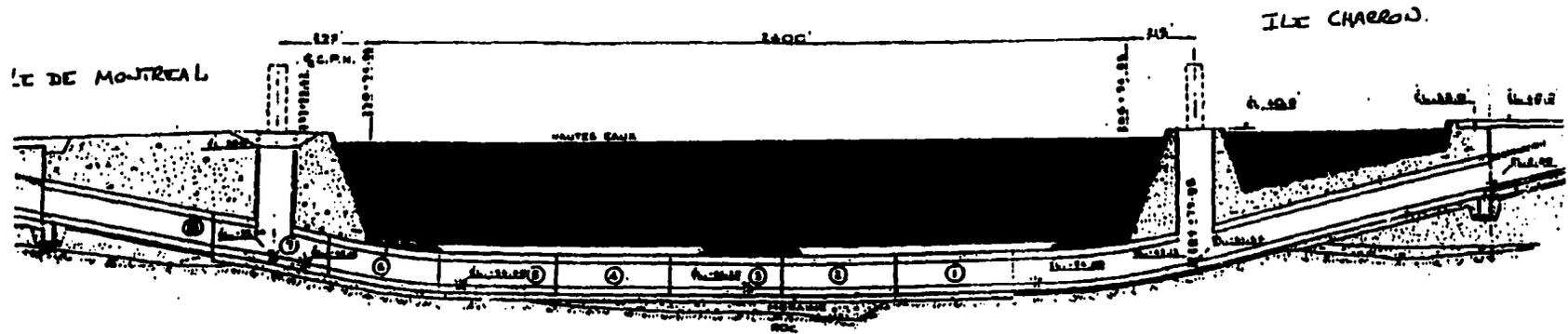
Pont tunnel Louis-H.-Lafontaine

N

Tour de ventilation nord

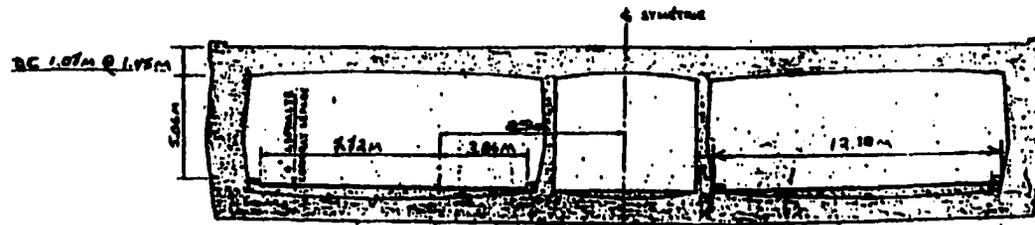
Tour de ventilation sud

S



COUPE LONGITUDINALE

173



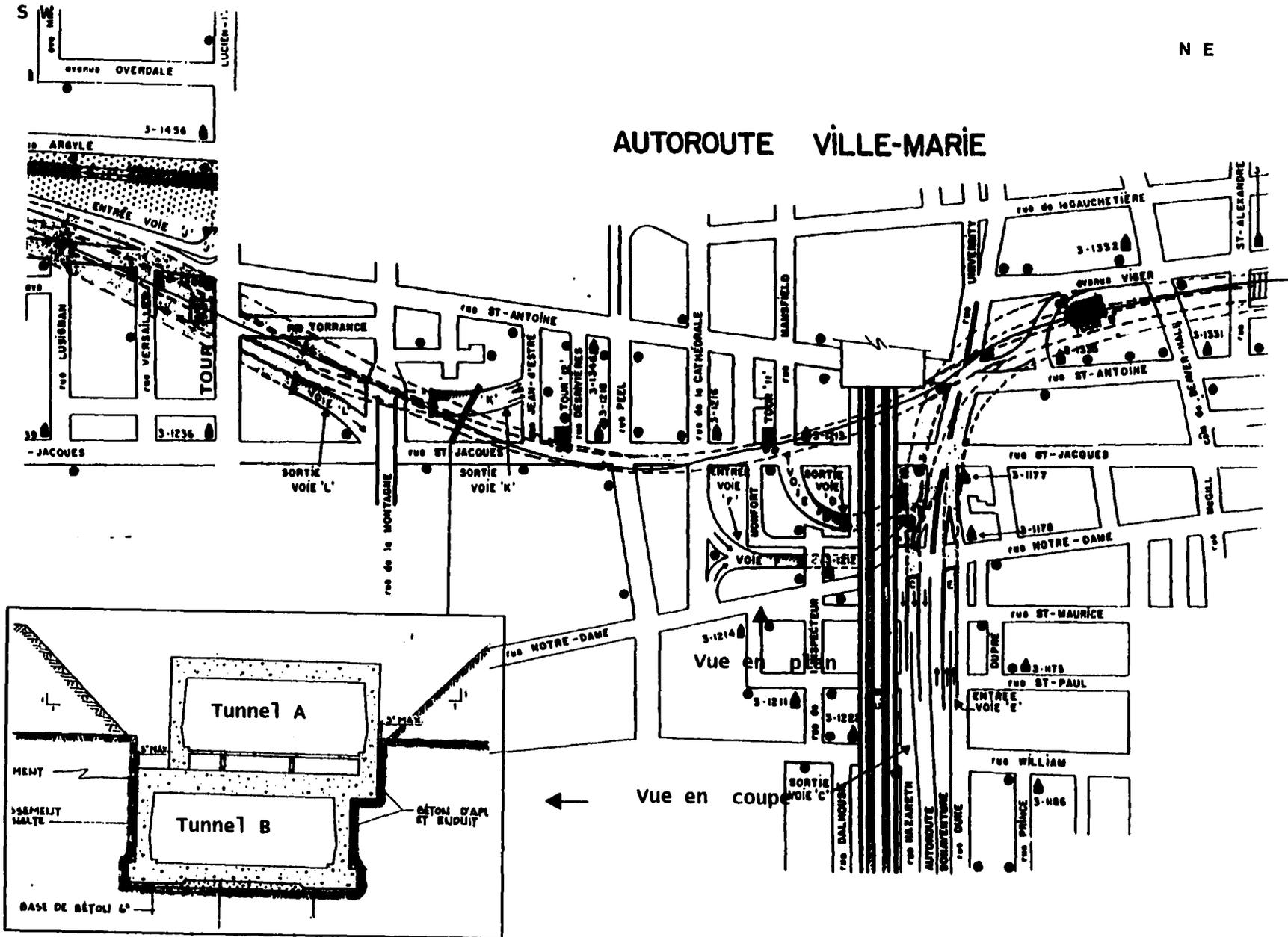
COUPE TRANSVERSALE

Tunnel ville-Marie

N E

AUTOROUTE VILLE-MARIE

174



ANNEXE E :
Liste des rapports concernant le traitement des infiltrations d'eau dans les tunnels
Ville-Marie et Lafontaine

- D. Palardy et G. Ballivy (1996) *Suivi de l'injection du Pont-tunnel L.-H.-Lafontaine, phase I*, rapport d'étape, 8 p., GR-96-07-01.
- D. Palardy, C. Dumont, et G. Ballivy (1996) *Suivi de l'injection du Pont-tunnel L.-H.-Lafontaine, phases I et II*, 79 p., GR-96-10-01.
- C. Dumont, C. Ballivy, D. Palardy et G. Ballivy (1997) *Devis technique: Injection au coulis chimique du tunnel Ville-Marie*.
- D. Palardy et G. Ballivy (1997) *Instrumentation de la tour de ventilation nord, direction nord, pont-tunnel L.-H.-Lafontaine, rapport d'installation*, 15 p., GR-97-03-01.
- D. Palardy et G. Ballivy (1997) *Instrumentation de la tour de ventilation nord, direction nord, pont-tunnel L.-H.-Lafontaine, rapport du suivi – février à avril 1997*, 21 p., GR-97-05-01.
- D. Palardy, C. Ballivy et G. Ballivy (1997) *Devis technique: Injection au coulis de ciment et au coulis chimique du pont-tunnel L.-H.-Lafontaine*, 26 p., GR-97-11-02.
- D. Palardy et G. Ballivy (1998) *Instrumentation de la tour de ventilation nord, direction nord, pont-tunnel L.-H.-Lafontaine, rapport final du suivi - Année 1997*, 34 p., GR-98-02-01.
- C. Ballivy, J.-P. Vrignaud, D. Palardy et G. Ballivy (1998) *Rapport journalier des travaux d'injection, tunnel Ville-Marie*, 63 p., GR-98-02-03.
- J.-P. Vrignaud, G. Ballivy (1998) *Synthèse des essais d'acceptation réalisés sur les résines d'injection*, 14 p. GR 98-03-01.
- D. Palardy, C. Ballivy, J.-P. Vrignaud et G. Ballivy (1998) *Suivi des travaux d'injection au coulis de ciment et au coulis chimique, pont-tunnel L.-H.-Lafontaine*, 67 p., GR-98-03-02.
- D. Palardy, J.-P. Vrignaud et G. Ballivy (1998) *Inspection de l'efficacité des travaux d'injection réalisés au tunnel Ville-Marie et au pont-tunnel L.-H.-Lafontaine*, 34 p., GR-98-05-01.
- D. Palardy, J.-P. Vrignaud et G. Ballivy (1998) *Devis technique: Injection au coulis chimique des tunnels Ville-Marie et Georges-Vanier et du pont-tunnel L.-H.-Lafontaine*, 15 p., GR-98-10-02.
- J.-P. Vrignaud et G. Ballivy (1998) *Tunnel Ville-Marie: Instrumentation du radier - voie B, rapport préliminaire d'installation*, 30 p., GR-98-12-01.
- J.-P. Vrignaud et G. Ballivy (1998) *Tunnel Ville-Marie: Analyses de l'eau pour les infiltrations majeures dans les couloirs de service voie B et voie F*, 13 p., GR-98-12-02.

J.-P. Vrignaud, D. Palardy et G. Ballivy (1999) *Tunnel Ville-Marie: Instrumentation du radier - voie B, rapport final d'installation des piézomètres*, 30 p., GR-99-01-01.

J.-P. Vrignaud, D. Palardy et G. Ballivy (1999) *Tunnel Ville-Marie: Instrumentation du radier - voie B, rapport préliminaire d'installation du dispositif de captage de l'eau*, 13 p., GR-99-01-03.

J.E., Rhazi, A. Tarussov et G. Ballivy (1999) *Tunnel Ville-Marie: Auscultation de la céramique et de la chaussée - voie B, rapport préliminaire*, 30 p., GR-99-01-05.

D. Palardy, J.-P. Vrignaud et G. Ballivy (1999) *Rapport global pour l'étanchéité de structures souterraines: Pont-tunnel L.-H.-Lafontaine, tunnel Ville-Marie et tunnel Georges-Vanier*, 21 p., GR-99-02-01.

J.-P. Vrignaud, D. Palardy et G. Ballivy (1999) *Suivi des travaux d'injection au printemps 1999 aux tunnels Georges-Vanier, Ville-Marie et L.-H.-Lafontaine et recommandations pour les interventions futures*, 150 p., GR-99-07-01.