

NOTE TO USERS

The original manuscript received by UMI contains pages with slanted print. Pages were microfilmed as received.

This reproduction is the best copy available

UMI

**Contribution à l'étude des méthodes
d'injection des fissures dans le béton**

par

Richard Lapointe

Département de génie civil et mécanique appliquée

Université McGill

Montréal, Canada

Mai 1997

**MÉMOIRE SOUMIS À LA FACULTÉ DES ÉTUDES GRADUÉES ET DE
LA RECHERCHE RENCONTRANT PARTIELLEMENT LES
EXIGENCES POUR L'OBTENTION D'UNE MAÎTRISE EN GÉNIE**



National Library
of Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisitions et
services bibliographiques

395, 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.

0-612-29608-3

Remerciements

Cette étude, faisant partie d'un projet de recherche réalisé conjointement par le Département de génie et de mécanique appliquée de l'Université McGill et par l'Institut de recherche de l'Hydro-Québec (IREQ), l'auteur tient à remercier le Professeur Saeed Mirza et le Dr Kaveh Saleh pour leur soutien, leurs judicieux conseils et leur encouragement.

L'auteur remercie aussi les membres de l'Équipe Béton du Service Technologie des matériaux de la VPTI d'Hydro-Québec, mais tout particulièrement MM. Stéphane Tremblay et André Watier pour leur précieuse aide durant les essais en laboratoire. Il tient aussi à remercier l'Hydro-Québec pour son aide financière apportée au cours de la réalisation de ce projet de recherche.

Pour terminer, une pensée toute particulière est réservée aux parents, à la famille et à la conjointe de l'auteur pour leur aide, leur soutien moral et leurs judicieux conseils.

Résumé

Sachant de prime abord que toutes les structures de béton vont éventuellement souffrir d'une forme ou d'une autre de détérioration, il importe de soit les entretenir ou de les réparer pour qu'elles soient aptes à remplir leurs rôles. De cette manière, afin de réaliser des travaux d'entretien ou de réfection de qualité et durable, il est primordial de déterminer la ou les cause(s) du problème.

De cette manière en 1987, Hydro-Québec a décidé de mettre sur pied un groupe d'études dans le cadre du projet de recherche : *Développement des méthodes et des produits d'injection dans les structures en béton* pour étudier et évaluer les produits, les équipements et les méthodes d'injection. Ce projet de maîtrise fait partie de ce projet, mais plus d'emphase a été mise sur l'étude des méthodes d'injection. Ce mémoire traite en premier lieu de la fissuration du béton et des méthodes d'investigation. Par la suite, on décrit quelques techniques de réparations, dont l'injection. Le chapitre suivant est pour sa part consacré à l'injection du béton et on y traite des produits, des équipements et des méthodes d'injection. Suivent ensuite un résumé des essais en laboratoire antérieurs et les procédures expérimentales de la simulation en laboratoire de l'injection de grandes dalles de béton, dont les résultats sont présentés et analysés au chapitre qui suit. Ainsi, les résultats de la revue de la littérature, de l'étude et des essais en laboratoire montrent que:

- les coulis à base de ciment Portland ou microfin (ouverture < 0,5 mm) sont plus performants que les époxydes ou les polyuréthanes pour réparer des structures hydrauliques;
- les injections en laboratoire de coulis stables ont donné des résultats supérieurs à ceux des injections de coulis instables;
- ajouter du superplastifiant au coulis permet d'améliorer les caractéristiques rhéologiques du coulis tout en gardant de bonnes caractéristiques mécaniques;
- les équipements et les instruments jouent un rôle de premier plan dans la réussite d'une injection;
- aucune méthode ou procédure ne peut être généralisée à tous les chantiers, il faut dans certains cas, où l'intégrité structurale pourrait être compromise par l'injection, recourir à des analyses structurales poussées pour déterminer des paramètres d'injection efficaces et sécuritaires.

Abstract

Cracking is one of the most serious problems affecting concrete structures. It is important to repair them to maintain their level of service. In 1987, after experiencing problems during the injection of one of its concrete dams, Hydro-Quebec decided to carry out a research project to investigate the grouting products, equipment and procedures. This thesis is a part of these activities. The topics treated in the first chapter are concrete cracking and its investigation. Then, follows a brief description of concrete repair techniques, including examples of grouting. The next chapter describes the products, equipment and procedures used in concrete grouting. The following chapter is dedicated to laboratory simulation of the injection of concrete structures: previous experimental work is summarized and the procedures of slab injection followed for this study are explained. The experimental results and their analysis are included in the next chapter.

The results of both the literature review and the laboratory study show that:

- cement-based grouts, either Portland or microfine cement (opening < 0.5 mm), are more effective to repair concrete hydraulic structures than chemical grouts;
- experimental injections of stable grouts gave results superior to those of unstable grouts;
- superplasticizers should be added to the cement-based grout mix to improve its rheological properties while it still keeps good mechanical properties;
- the grouting equipment and monitoring instruments play a major role in the success of an injection;
- no method can fit all sites: in some cases, where structural integrity could be jeopardized during the injection process, structural analysis can be required to determine safe and efficient parameters.

Table des matières

Remerciements	i
Résumé	ii
Abstract	iii
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	viii
1.0 Introduction	1
2.0 Fissuration du béton	2
2.1 Causes de la fissuration	2
2.1.1 Fissuration du béton plastique	5
2.1.2 Fissuration du béton durci	6
2.2 Méthodes d'investigation	11
2.2.1 Inspection visuelle	11
2.2.2 Inspection destructive	11
2.2.3 Inspection non destructive	18
2.3 Fissuration des barrages	19
3.0 Injection	24
3.1 Méthodes de réparation du béton	24
3.2 Types d'injection	27
3.3 Qu'arrive-t-il durant l'injection?	29
3.3.1 Fissures d'ouverture appréciable	29
3.3.2 Fissures fines	32
3.4 Facteurs affectant la pénétration	33
3.4.1 Caractéristiques de la fissure	33
3.4.2 Propriétés des coulis	34
3.5 Moments et produits propices	41
4.0 Injection du béton	43
4.1 Matériaux	43
4.1.1 Produits chimiques	43
4.1.2 Produits à base de ciment	45
4.1.3 Ajouts et adjuvants	46
4.1.4 Composition des mélanges	48
4.2 Équipements	49
4.2.1 Équipements pour l'injection de produits chimiques	49
4.2.2 Équipements pour l'injection de coulis de ciment	50
4.2.3 Instrumentation	56
4.3 Méthodes	58
4.3.1 Injection de sol et de roc	58
4.3.2 Injection du béton	64

4.4 Paramètres d'injection	73
4.4.1 Pression maximale	73
4.4.2 Pression de refus	74
4.4.3 Débit	75
4.4.4 Relation pression-débit	78
5.0 Injections expérimentales en laboratoire	80
5.1 Travaux en laboratoire antérieurs	80
5.2 Problématique et objectifs	81
5.3 Fabrication des dalles	82
5.4 Banc d'essai	83
5.5 Équipements et instrumentation	83
5.6 Coulis d'injection	84
5.7 Injection	86
5.8 Carottage et séparation des dalles	86
6.0 Résultats et analyse des résultats	87
6.1 Dalle 31	88
6.2 Dalle 32	98
6.3 Dalle 33	106
6.4 Conclusions et recommandations	115
7.0 Conclusions et recommandations générales	119
8.0 Bibliographie	122
Annexe A Résultats de l'injection de la dalle 31	
Annexe B Résultats de l'injection de la dalle 32	
Annexe C Résultats de l'essai d'eau de la dalle 33	
Annexe D Résultats de l'injection de la dalle 33	

Liste des figures

Chapitre 2

Figure 2.1	Exemples de fissurations intrinsèques d'une structure de béton	4
Figure 2.2	Arborescence des principaux types de fissuration du béton	5
Figure 2.3	Processus de corrosion de l'armature	8
Figure 2.4	Exemples de fissures causées par des charges	10
Figure 2.5	Caméras pour inspecter les trous de forage	12
Figure 2.6	Paliers de pression des essais d'eau selon Houlsby	14
Figure 2.7	Paliers de pression des essais d'eau selon Weaver	14
Figure 2.8	Facteurs à considérer pour la correction de la pression	15
Figure 2.9	Types de fissuration du barrage Daniel-Johnson	22

Chapitre 3

Figure 3.1	Calfatage	25
Figure 3.2	Point de suture ou «Stitching»	25
Figure 3.3	Ajout d'armature conventionnelle	26
Figure 3.4	Ajout d'armature précontrainte	26
Figure 3.5	Trou de forage interceptant des fissures	27
Figure 3.6	Fissures horizontales et fissures verticales	30
Figure 3.7	Injection d'une fissure horizontale	31
Figure 3.8	Particules s'écoulant dans une fissure	32
Figure 3.9	Types de fluides	35
Figure 3.10	Profil de la distribution de la vitesse d'écoulement	36
Figure 3.11	Modes de rupture des coulis d'injection	41
Figure 3.12	Effets de la température	42

Chapitre 4

Figure 4.1	Circuit typique pour l'injection de coulis de ciment	51
Figure 4.2	Fonctionnement d'un malaxeur colloïdal	52
Figure 4.3	Agitateur typique	53
Figure 4.4	Pompe de type Moyno	54
Figure 4.5	Fonctionnement d'une pompe à piston	55
Figure 4.6	Fonctionnement d'une pompe à bélier	55
Figure 4.7	Fonctionnement d'une pompe à diaphragme	56
Figure 4.8	Réseau du système d'acquisition de donnée	57
Figure 4.9	Injection descendante sans obturateur	59

Figure 4.10	Injection descendante avec obturateur	59
Figure 4.11	Injection ascendante	59
Figure 4.12	Injection en circuit	60
Figure 4.13	Injection selon le «MPSP»	61
Figure 4.14	Phases successives de colmatage lors de l'injection par la méthode classique d'une fissure plongeante	67
Figure 4.15	Différents cas possibles durant une injection de type G.I.N.	72
Figure 4.16	Évolution du débit dans le temps	77
Figure 4.17	Débit élevé sur une période prolongée	77
Figure 4.18	Débit incontrôlable causé par une fuite ou des déplacements	77
Figure 4.19	Traitements des anomalies	78
Figure 4.20	Courbes du débit et de la pression	79
Chapitre 5		
Figure 5.1	Réseau des équipements et des instruments	85
Chapitre 6		
Figure 6.1	Dalle 31 dans le bâti métallique	89
Figure 6.2	Courbe d'isopénétration (sec) de la dalle 31	91
Figure 6.3	Profil de la pression au début de l'injection aux différents points sur la dalle 31	92
Figure 6.4	Profil de la pression à la fin de l'injection aux différents points sur la dalle 31	92
Figure 6.5	Courbe d'isopression (kPa) au début (t = 14 min) de l'injection de la dalle 31	93
Figure 6.6	Résumé du déroulement de l'injection de la dalle 31	96
Figure 6.7	Dalle 32 dans le bâti métallique	98
Figure 6.8	Courbe d'isopénétration (sec) de la dalle 32	100
Figure 6.9	Courbe d'isopression (kPa) au début (t = 34 min) de l'injection de la dalle 32	103
Figure 6.10	Résumé du déroulement de l'injection de la dalle 32	105
Figure 6.11	Dalle 33 dans le bâti métallique	106
Figure 6.12	Courbe d'isopénétration (sec) de la dalle 31	109
Figure 6.13	Courbe d'isopression (kPa) au début (t = 28 min) de l'injection de la dalle 33	110
Figure 6.14	Résumé du déroulement de l'injection de la dalle 33	113

Liste des tableaux

Chapitre 2

Tableau 2.1	Classification des fissures intrinsèques	3
Tableau 2.2	Interprétation des essais Lugeon	17

Chapitre 3

Tableau 3.1	Critères de pénétrabilité	39
--------------------	---------------------------	----

Chapitre 4

Tableau 4.1	Essais sur les poudres de ciment	48
Tableau 4.2	Essais sur les coulis frais	49
Tableau 4.3	Essais sur les coulis durcis	49
Tableau 4.4	Avantages des diverses procédures	62
Tableau 4.5	Inconvénients des diverses procédures	63
Tableau 4.6	Pression de refus	75
Tableau 4.7	Importance des débits	76

Chapitre 6

Tableau 6.1	Résumé des injections des grandes dalles à l'Hydro-Québec	87
--------------------	---	----

1.0 Introduction

Tous les ouvrages de béton vont éventuellement souffrir de dégradations qui peuvent affecter leur apparence, leur durabilité et même leur performance. Les causes de ces détériorations sont d'origines physiques, chimiques, biologiques ou structurales. La fissuration, qui se manifeste sous diverses formes, est l'une des principales causes de dégradation et peut parfois apparaître dès la mise en place du béton.

Les barrages en béton, poids ou voûte, n'échappent évidemment pas à ce phénomène. C'est pourquoi il importe de les inspecter régulièrement, comme toutes autres structures d'ailleurs, pour évaluer jusqu'à quel point ils peuvent être affectés. Ces inspections sont aussi très utiles puisqu'en plus de permettre de déceler des problèmes potentiels, elles permettent de diagnostiquer la ou les cause(s) de ces problèmes. De cette manière, le choix des produits, équipements et méthodes de réparation pour des travaux efficaces et durables risque d'être plus judicieux.

L'injection est l'une des méthodes de réparation du béton les plus prisées. Quoique simple en théorie, cette technique devient difficile à appliquer étant donné que les informations nécessaires sur le milieu à réparer sont limitées et qu'il existe de nombreux produits, équipements et méthodes d'injection. De plus, la plupart de ceux-ci sont plutôt adaptés à l'injection du roc ou de sols granulaires, ce qui rend nécessaire d'étudier plus en détails l'injection des fissures dans le béton.

Ainsi en 1987, Hydro-Québec a décidé de mettre sur pied un groupe d'études dans le cadre du projet de recherche: *Développement des méthodes et des produits d'injection dans les structures en béton* pour étudier et évaluer les produits, les équipements et les méthodes d'injection. Ce projet de maîtrise fait partie de ce projet, mais plus d'emphase a été mise sur l'étude des méthodes d'injection. Ce mémoire traitera d'abord au chapitre 2 de la fissuration du béton en général et de celle des barrages en particulier. Par la suite, on décrit au chapitre 3 quelques techniques de réparations, dont l'injection. Le chapitre 4 est pour sa part consacré à l'injection du béton et on y traite des produits, des équipements et des méthodes d'injection. Suivent ensuite au chapitre 5 un résumé des essais en laboratoire antérieurs et les procédures expérimentales de la simulation en laboratoire de l'injection de grandes dalles de béton. Les résultats des différentes injections sont présentés et analysés au chapitre 6. Finalement au chapitre 7, on termine avec les conclusions et les recommandations générales.

2.0 Fissuration du béton

La performance du béton ne doit pas seulement être jugée qu'en fonction de sa résistance en compression. Toute structure doit aussi être durable, i.e. être capable de maintenir un niveau de service pour une certaine période de temps: la structure doit résister durant sa vie utile aux forces appliquées et aux effets de son environnement sans subir de détériorations excessives ou de ruptures. Les principaux facteurs qui peuvent affecter la durabilité des structures de béton sont regroupés en quatre groupes, soit ceux reliés [Mailvaganam, 1991]:

- à la conception;
- aux pratiques de construction;
- aux caractéristiques des matériaux;
- aux conditions d'exposition et d'exploitation.

La détérioration, ou n'importe quel changement néfaste des propriétés mécaniques, physiques ou chimiques à la surface ou à l'intérieur d'une masse de béton, peut être associée à une des phases de la vie d'une structure: conception, construction ou exploitation. Les effets peuvent être visibles ou non et apparaissent sous trois formes différentes: la désintégration, l'éclatement ou la fissuration qui peuvent apparaître séparément ou simultanément. Dans ce chapitre, l'emphase sera mise d'abord sur la fissuration du béton et ensuite sur la fissuration, qui affecte les barrages.

2.1 Causes de la fissuration

Des fissures apparaîtront aussitôt que la déformation en traction ou en cisaillement imposée dépassera la limite de la déformation en traction ou en cisaillement du béton. Différents mécanismes peuvent engendrer de telles déformations comme [CEB, 1993]:

- les mouvements générés à l'intérieur du béton créés par le retrait, l'expansion ou la contraction lorsque celui-ci est soumis à des variations de température ou au retrait plastique;
- l'expansion d'un matériel noyé dans le béton, comme dans le cas de la corrosion de l'acier d'armature ou le gonflement du béton résultant de la réaction alcali-granulats;
- les conditions externes comme les charges ou les déformations qui induisent des contraintes.

Tableau 2.1 Classification des fissures intrinsèques
(Adapté de CEB, 1993 et de Mailvaganam, 1991)

Type de Fissure	Position	Subdivision	Endroit plus commun	Cause Principale	Autres causes ou facteurs	Manifestation	Remarques	Apparition
Sédimentation	A	Trop d'armature	Sections épaisses	Resuage excessif	Séchage rapide	Fissures le long de l'armature	Fissures larges > 1 mm	10 min à 3 h après la coulée
	B	Arche	Haut des colonnes			Fissures où il y a variation d'épaisseur et de forme		
	C	Changement d'épaisseur	Dalles					
Retrait plastique	D	Diagonale	Dalles	Séchage rapide	Taux de resuage faible	Fissures sur les surfaces exposées	Fissures larges 2 à 4 mm	30 min à 6 h après la coulée
	E	Aléatoire	Dalles de béton armé	Séchage rapide Armature en surface				
	F	Trop d'armature	Dalles de béton armé					
Contraction thermique prématurée	G	Restriction interne	Murs épais	Chaleur d'hydratation	Refroidissement rapide	Fissures perpendiculaires à l'armature ou selon les restrictions	Peut être contrôlé	1 journée
	H	Restriction externe	Murs ou dalles épais	Gradient thermique				à 2 semaines après la coulée
Retrait de séchage	I		Murs et dalles minces	Joints inefficaces	Cure inadéquate Retrait trop important	Similaires aux fissures de traction	Fissures fines (ouverture contrôlée avec l'armature)	Plusieurs mois ou années après la construction
Craquelage	J	Près des coffrages		Formes imperméables	Cure inadéquate			1 à 7 jours après la coulée
	K	Béton flâté	Dalles	Trop flâté	Mélange trop riche			
Corrosion de l'armature	L	Naturelle	Colonnes et poutres	Couverture insuffisante	Béton de mauvaise qualité	Fissures le long de l'armature	Fissures initiales fines (< 0,2 mm) qui s'agrandissent	2 ans et plus
	M	Chlorure	Où on utilise des sels de déglçage ou environnement marin	Trop de chlorure				
Réactions alcali-granulats	N		Endroits humides	Granulats réactifs		Fissuration orthogonale	Fissures larges > 1 mm	5 ans et plus

Les deux premiers mécanismes vont résulter en des fissures intrinsèques alors que le dernier cause des fissures extrinsèques, le tableau 2.1 et la figure 2.1 montrent d'ailleurs plus en détail sur une structure les principaux types de fissuration et leurs caractéristiques.

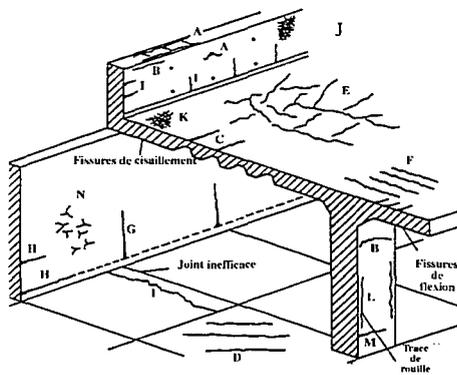


Figure 2.1 Exemples de fissurations intrinsèques d'une structure de béton (CEB, 1993)

Ces mécanismes peuvent commencer à agir immédiatement après le malaxage du béton, mais celui-ci est particulièrement vulnérable durant la période où il commence à durcir: cette période est critique puisque le béton a une très faible résistance en traction quand il est soumis à une certaine déformation. Les fissures peuvent être classées selon leur [Mailvaganam, 1991]:

- orientation:
 - longitudinale;
 - transversale;
 - verticale;
 - diagonale;
 - aléatoire;
- occurrence:
 - fissures multiples;
 - fissure unique;
- profondeur:
 - de surface;
 - profonde;
 - traverse la membrure au complet;
- ouverture:
 - très fine < 0,5 mm;
 - fine < 0,5 mm à 1 mm;
 - moyenne 1 à 2 mm;
 - large > 2 mm;
- état:
 - active (s'ouvre et se referme selon les conditions);
 - morte (pas d'évolution ou se stabilise avec le temps);
 - progressive (s'élargit avec le temps).

L'arborescence des principaux types de fissures est illustrée à la figure 2.2 et montre bien que les fissures apparaissent soit dans la phase plastique du béton ou soit quand celui-ci est durci.

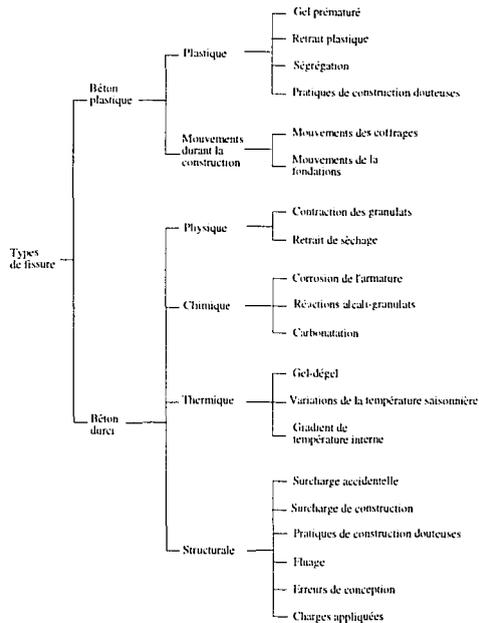


Figure 2.2 Arborecence des principaux types de fissuration du béton (Adaptée du CEB, 1993 et de Mailvaganam, 1991)

2.1.1 Fissuration du béton plastique

Les fissures par retrait et celles par ségrégation sont différentes, bien qu'elles fassent toutes deux leur apparition dans la phase plastique du béton au moment où celui-ci est particulièrement vulnérable.

Fissures plastiques par retrait [ACI, 1984]

Les fissures plastiques par retrait affectent surtout les éléments de béton ayant une grande aire de surface, comme les dalles ou les planchers, quand il y a une perte rapide

d'humidité occasionnée par un faible taux d'humidité, par le vent ou par une température élevée. Ce retrait, qui apparaît avant la finition finale et avant le début du mûrissement, est causé par l'évaporation de l'eau à la surface du béton frais trop rapide pour que celle-ci soit compensée par l'eau de ressuage. La fissuration apparaît puisque le béton sous le béton de surface qui sèche impose une restriction de mouvement résultant en des contraintes de traction excessives dans le béton. Habituellement, ce type de fissure n'affecte que la surface, mais il peut aussi arriver qu'il traverse complètement un élément.

Fissures par ségrégation [CEB, 1993]

Quant aux fissures occasionnées par la ségrégation, elles apparaissent quand le changement de volume, provoqué par le ressuage induit par les particules de béton qui tendent à se déposer sous l'influence de l'attraction gravitationnelle, est restreint soit par l'armature ou par les coffrages. Ces fissures sont longitudinales et se retrouvent surtout sur des éléments épais.

2.1.2 Fissuration du béton durci

Tous les autres types de fissure vont faire leur apparition une fois que le béton commence à durcir.

Fissures par retrait de séchage [ACI, 1984]

Ces fissures sont causées par un retrait résultant d'une perte d'humidité de la pâte de ciment qui est restreint par les autres parties de la structure ou par la base. Le retrait de la pâte de ciment, elle-même, peut atteindre jusqu'à 1 % par unité de longueur, mais les granulats du béton permettent de réduire ce retrait à environ 0,05 %. Dans le cas de structures plus massives, les contraintes de traction sont engendrées par un retrait différentiel entre la surface et l'intérieur.

Fissures causées par des réactions chimiques [Mehta, 1993]

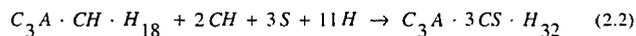
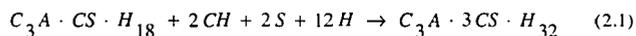
Cette forme de fissuration est causée par l'expansion des produits de réaction à l'intérieur de la masse de béton durci. Ces produits proviennent des réactions chimiques entre les granulats, le ciment, les adjuvants ou de tous les autres agents entrant en contact avec le béton une fois celui-ci durci. Ces fissures auront ensuite pour effet d'augmenter la perméabilité du béton, ce qui le rend le béton encore plus vulnérable.

De cette manière, lorsque la silice des granulats et les alcalis du ciment réagissent entre eux, il en résulte un gel expansif qui draine l'eau des autres portions du béton. Ce gel cause donc une expansion locale avec les contraintes de traction qui lui sont associées. Cette réaction alcali-granulats se retrouve sous trois formes distinctes:

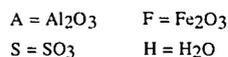
- alcali-carbonate;
- alcali-silice;
- alcali-silicate.

L'attaque des sulfates contenues dans les eaux ou les sols agressifs est une autre cause de fissuration provoquée par des réactions chimiques. En effet, la formation d'ettringite ou de gypse engendre une augmentation de volume qui peut provoquer la fissuration. Les équations régissant la formation de ces produits expansifs sont:

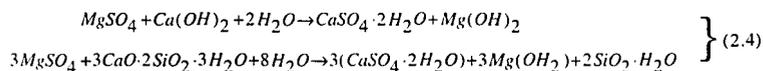
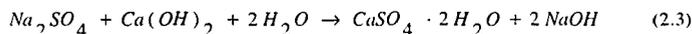
Ettringite



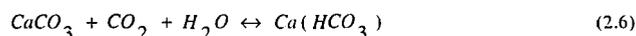
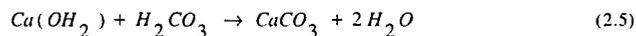
où



Gypse



Il arrive aussi que le dioxyde de carbone combine avec les hydroxydes de calcium de la pâte de ciment hydraté pour former du carbonate de calcium, mais étant donné que celui-ci occupe un volume moins important que l'hydroxyde de calcium, il s'ensuit un retrait.



Fissures causées par les conditions climatiques [ACI, 1984]

Le béton est aussi affecté par les cycles de gel-dégel. La dégradation est occasionnée par le gel de l'eau dans la pâte de ciment, dans les granulats ou même dans les deux à la fois.

Ainsi, les dommages dans la pâte de ciment sont produits par la migration de l'eau vers les sites de gel ou par la formation de cristaux de glace qui crée des contraintes de traction par augmentation de volume. Pour leur part, les granulats, comme ils sont saturés d'eau et comme ils sont enrobés de pâte de ciment qui empêche l'eau de s'échapper, vont prendre de l'expansion durant le gel. Cette expansion peut fissurer soit la pâte ou le granulat.

La fissuration peut aussi être engendrée par des cycles de mouillage-séchage ou par des cyclages thermiques. Ainsi, si le changement de volume qu'ils causent est suffisant, des fissures pourraient apparaître.

Fissures causées par la corrosion de l'armature [ACI, 1984]

Habituellement, l'acier d'armature noyé dans le béton ne se corrode pas puisqu'il est protégé par une couche d'oxyde dans la passivité qu'offre cet environnement très alcalin. Par contre, cette passivité peut être altérée par la carbonatation ou des ions agressifs comme les chlorures. C'est seulement une fois cette passivité altérée que le processus de dégradation peut débiter. Cependant, la corrosion, un procédé électrochimique, requiert la présence d'un agent oxydant, de l'eau et d'un flux d'électrons dans le métal pour avoir lieu. C'est ainsi qu'une série de réactions chimiques ont lieu sur ou près de la surface de l'armature d'acier, comme le montre la figure 2.3.

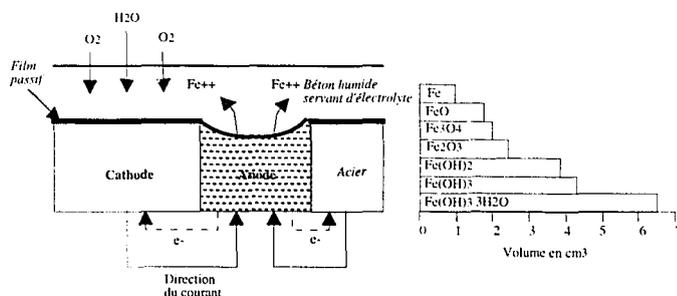
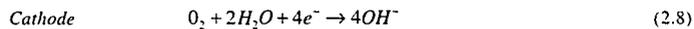


Figure 2.3 Processus de corrosion de l'armature
(Adaptée de Mehta, 1993 et du CEB, 1993)

Aux points appelés anodes, il peut en effet y en avoir plusieurs sur chaque barre d'acier, le métal perd des électrons pour former des ions dans la solution adjacente.



À d'autres points, les cathodes, l'oxygène et l'eau se combinent aux électrons libres pour former des ions hydroxyde. Ces derniers vont migrer dans la solution vers l'anode où ils forment avec les ions de métal des oxydes. Ainsi, la rouille (oxyde de fer) se dépose à l'anode et cause une augmentation de volume qui crée des contraintes résultant en des fissures radiales autour de l'armature.



Ces fissures peuvent se propager longitudinalement et causer la délamination du béton. Ces fissures vont, par la suite, permettre à l'oxygène, l'eau et les chlorures d'atteindre plus aisément l'armature ce qui permet au processus de continuer et même de s'accélérer.

Fissures causées par des pratiques douteuses de construction [ACI, 1984]

Des fissures peuvent aussi se former si les règles de l'art de la construction d'ouvrages de béton ne sont pas respectées. La plus douteuse de ces pratiques est l'ajout d'eau au béton pour améliorer sa maniabilité. Cette pratique engendre des effets néfastes comme une perte de résistance ou une augmentation du retrait. Si en plus on augmente la quantité de ciment pour contrecarrer ces effets indésirables, il en résultera une différence accrue entre la température à la surface et celle à l'intérieur de la masse de béton, ce gradient de température crée des contraintes de traction pouvant éventuellement faire fissurer le béton.

Il arrive aussi que l'on néglige ou que l'on prenne à la légère le mûrissement. Ceci doit être évité puisque cela entraîne une augmentation du retrait à un moment où la résistance du béton est plutôt faible. Une période de mûrissement inadéquate entraîne une baisse de la résistance à long terme mais aussi une réduction notable de la durabilité.

Fissures causées par des surcharges durant la construction [ACI, 1984]

Ces surcharges peuvent parfois être beaucoup plus importantes que les charges pour lesquelles les éléments ont été conçus. De plus, ces surcharges se produisent souvent quand le béton est jeune et qu'il est le plus vulnérable.

Les éléments en béton prémoulés sont particulièrement sujets à cette forme de fissuration. En effet, lors de leur transport s'ils ne sont pas manipulés ou entreposés correctement, ils peuvent être soumis à des contraintes pour lesquels ils n'ont pas été conçus. Le béton précontraint, pour sa part, peut se fissurer au moment si la précontrainte est enlevée sans se préoccuper de la séquence dans laquelle les câbles sont relâchés. Quant au béton coulé

en place, il peut lui aussi être soumis à des surcharges durant la construction, qui peuvent provoquer des fissures. Ces surcharges sont surtout induites par le stockage de matériel et par l'opération de certains équipements.

Fissures causées par des erreurs de conception [ACI, 1984]

Pour concevoir adéquatement des éléments de béton, il faut vraiment comprendre comment se comporte la structure. Malheureusement, il arrive souvent qu'on néglige cet aspect, ce qui peut résulter dans une fissuration qui compromet non seulement le niveau de service de l'ouvrage mais qui peut aussi aller jusqu'à des ruptures catastrophiques.

Habituellement, les fissures de cette nature sont causées par des concentrations trop élevées de contraintes suite à une mauvaise conception de l'armature, des joints de construction ou des fondations.

Le mouvement d'éléments mal conçus sujets à des changements de volume causés par une variation de la température ou du taux d'humidité est aussi responsable de contraintes de traction capables de fissurer le béton.

Fissures causées par des charges appliquées [CEB, 1993]

Il est bien connu que le béton sollicité en tension, en flexion, en cisaillement ou même en torsion est susceptible de se fissurer. Le béton peut aussi se fissurer si les contraintes locales deviennent excessives comme dans le cas des contraintes induites par la précontrainte du béton. Les fissures qui en résultent sont illustrées à la figure 2.4.

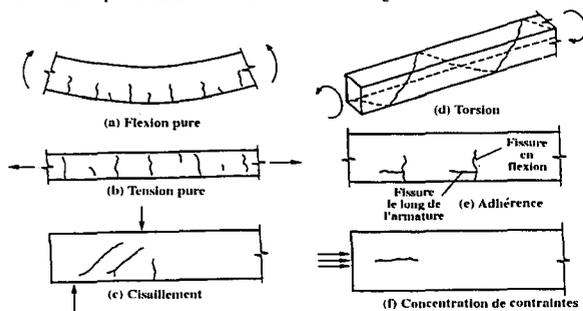


Figure 2.4 Exemples de fissures causées par des charges (CEB, 1993)

2.2 Méthodes d'investigation

Avant de réparer des fissures, il est primordial de déterminer leur emplacement, leur étendue, leurs causes et la pertinence de les réparer. Pour ce faire, on doit calculer les contraintes engendrées par les différents cas de chargement et consulter les plans, les devis ainsi que les registres de construction et d'entretien.

2.2.1 Inspection visuelle [ACI, 1984]

L'inspection visuelle s'avère un moyen simple et efficace de déterminer l'emplacement et l'étendue des fissures superficielles. Pour y arriver, il suffit de localiser et de noter l'ouverture des fissures sur un dessin. Il est aussi intéressant de noter l'emplacement des taches de rouilles, de l'armature à nue ou de tout autres détériorations de surface. Si nécessaire, des photographies peuvent compléter l'inspection.

Des outils sont d'ailleurs disponibles pour faciliter ce travail. Ainsi, un comparateur de fissure avec ou sans microscope est très utile pour déterminer l'ouverture des fissures, alors que les indicateurs de mouvement, soit mécaniques ou électriques (LVDT), servent à indiquer la direction et la grandeur du mouvement de ces fissures.

2.2.2 Inspection destructive

Suite aux inspections visuelles qui ne fournissent que l'information sur les fissures superficielles, des inspections destructives peuvent suivre pour compléter l'étude. On procède alors au forage de trou, d'où seront extraites des carottes. Autant les trous que les carottes sont utiles pour déterminer la présence, l'étendue et la profondeur des fissures. Divers essais et analyses peuvent être conduits sur les carottes prélevées dans les zones saines et dégradées, dont entre autres [ACI, 1984]:

- essais de compression ou de traction pour évaluer la qualité du béton;
- analyses chimiques pour déterminer la présence de chlorures pouvant indiquer la corrosion de l'armature;
- analyses pétrographiques pour déterminer la présence de produits de la réaction alcali-granulats ou de d'autres réactions agressives.

Les trous de forage, quant à eux, peuvent être inspectés pour évaluer avec précision l'ouverture, l'emplacement et l'inclinaison de la fissure. Diverses techniques sont accessibles pour ces inspections, comme [Houlsby, 1990]:

- une caméra vidéo que l'on descend dans le trou de forage. Deux types de caméra existent, comme le montre la figure 2.5.
- un périscope qui comprend des tubes et un miroir descendus dans le trou. Le principe est le même que celui des caméras dotées de miroirs inclinés.

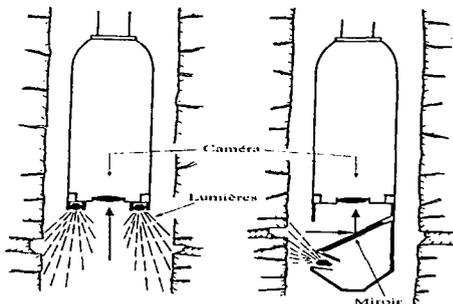


Figure 2.5 Caméras pour inspecter les trous de forage (Houlsby, 1990)

De plus, depuis plusieurs décennies déjà, les essais d'eau sont utilisés pour évaluer la perméabilité des milieux à traiter à l'aide de l'injection. Ces essais sont effectués selon une procédure établie s'adaptant au milieu:

- l'essai Lugeon pour les milieux fissurés (roc-béton)
- l'essai Lefranc pour les milieux granulaires (sol).

Plusieurs auteurs, dont Ewert [Ewert, 1992], Lombardi [Houlsby, 1990] et Houlsby [Houlsby, 1990], jugent que les essais d'eau en eux-mêmes ne sont pas suffisants pour évaluer un milieu donné, ils doivent être analysés en parallèle avec les résultats d'études géologiques ou de d'autres méthodes d'investigation, comme celles des caméras ou des périsopes qui permettent de visualiser les fissures. De plus, ils jugent que la valeur de perméabilité obtenue de ces tests n'est pas absolue et qu'il est très difficile à partir de cette valeur, voire impossible, de trouver une relation pour déterminer le coefficient de conductivité hydraulique des milieux étudiés ou une relation qui puisse prédire la quantité de coulis nécessaire pour l'injection. Toutefois, ces essais demeurent très utiles pour déterminer la pertinence ou les

conséquences d'une injection et sont aussi très simple à réaliser. D'ailleurs des essais plus sophistiqués et dispendieux ne donnent guère des résultats plus précis [Houlsby, 1990].

Essai Lugeon

Les principes de cet essai ont été établis en 1933 par un Français nommé Maurice Lugeon. Cependant, il en avait seulement tracé les grandes lignes, mais il avait, par contre, défini l'unité de mesure et soumis une interprétation des résultats. Depuis ce temps, les procédures ont été quelque peu changées pour s'adapter aux différents milieux et ont été normalisées. L'unité de mesure, le Lugeon (Lu), a cependant été conservée, soit 1 l/min/m à une pression de 10 bars (1 MPa) [Houlsby, 1990].

Il existe deux grands types d'essais Lugeon [Weaver, 1991]:

- l'essai exploration pour évaluer la perméabilité d'un site;
- l'essai préliminaire qui précède une injection.

Essai exploratoire

On réalise un essai d'eau exploratoire de type Lugeon, plus complet qu'un simple essai préliminaire, pour [Weaver, 1991]:

- décider si l'injection est pertinente ou non;
- déterminer les pressions critique et maximale;
- évaluer l'importance du réseau de fissures;
- identifier les anomalies (dilatation, fuite, érosion, fracturation);
- vérifier si les standards d'imperméabilité ont été atteints durant les injections précédentes;
- évaluer le volume de coulis nécessaires.

Il existe plusieurs procédures pour effectuer cet essai. La méthode la plus simple consiste à tester un trou pendant qu'on le fore. Ainsi, on utilise la procédure des passes descendantes (section 4.4.2) où seulement un obturateur est installé pour isoler une longueur de section d'environ 5 m. On peut aussi réduire la longueur des sections pour obtenir des informations plus précises ou les allonger si, et seulement si, on sait que le réseau de fissuration est uniforme. Sur d'autres sites, on peut être obligés de tester des trous déjà existants, on doit alors utiliser deux obturateurs pour isoler la longueur de trou nécessaire à l'essai. Cette méthode peut sembler plus simple et plus rapide, mais les résultats sont plutôt incertains [Houlsby, 1990]. Ainsi, à chaque section, on applique cinq paliers de pression de

10 min chacun, comme le montre la figure 2.6. Dans la plupart des cas, il importe que la pression appliquée durant ces essais varie selon le milieu et la profondeur. Tout au début, Lugeon avait suggéré d'utiliser en tout temps, une valeur de 10 bars (1 MPa ou ~150 psi), mais cette valeur est beaucoup trop élevée pour un usage généralisé, elle pourrait entraîner des dommages. C'est pourquoi, on se réfère plutôt au principe général (section 4.5.1) et on se doit d'utiliser des pressions inférieures à celles qui auraient été utilisées pour une véritable injection, en s'assurant toutefois que la pression utilisée est toujours 20 % plus élevée que la pression de la colonne d'eau imposée par le réservoir s'il y en a un [Ewert, 1992].

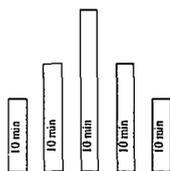


Figure 2.6 Paliers de pression des essais d'eau selon Housby

D'autres vont préconiser un essai comprenant plus de paliers [Weaver, 1991]. En effet, des ingénieurs suisses préfèrent recourir à un éventail de pressions plus varié, ils utilisent donc 9 paliers à des pressions définies, comme le démontre la figure 2.7.

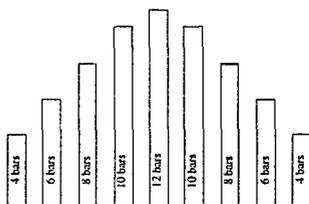


Figure 2.7 Paliers de pression des essais d'eau selon Weaver

Pour interpréter les résultats, on peut soit calculer la valeur Lugeon ou tracer la courbe du débit (Q) en fonction de la pression (P). Certains auteurs, comme Housby [Housby, 1990] préfèrent de beaucoup calculer les valeurs et trouvent futile le traçage de cette courbe P-Q. Par contre, d'autres auteurs comme Ewert ou Kutzner [Ewert, 1992] aiment interpréter les résultats en traçant la courbe P-Q et en calculant la valeur Lugeon en tenant compte de la correction à apporter à la pression, ce que Housby, même s'il admet en tenir compte dans son interprétation, trouve inutile [Housby, 1990]. Ewert est aussi d'avis qu'il est absolument

nécessaire d'analyser les résultats en tenant compte de la géologie ou de la fissuration du milieu.

L'équation suivante est utilisée pour calculer la valeur de perméabilité en Lugeon (Lu):

$$N = \frac{10 \cdot V}{P \cdot L \cdot t} \quad (2.9)$$

où P = pression (bars)
 V = volume d'eau absorbée (litre)
 L = longueur de la section (m)
 t = temps pour absorber le volume d'eau V (min).

La valeur de la pression (P) peut être corrigée en fonction de la pression hydrostatique, de la perte de pression par la friction des tuyaux et celle causée par la nappe phréatique (Figure 2.8).

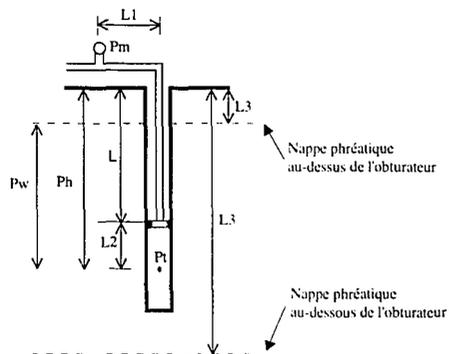


Figure 2.8 Facteurs à considérer pour la correction de la pression (Adaptée de Ewert, 1992)

La pression corrigée pour un test sous la nappe phréatique se calcul comme suit:

$$P_t = P_m + P_h - P_w - P_r \quad (2.10)$$

où P_t = pression corrigée
 P_m = pression lue au manomètre
 P_h = pression hydrostatique
 P_w = pression causée par la nappe phréatique
 P_r = perte causée par la friction des tuyaux.

Alors que si l'essai est effectué au-dessus de la nappe phréatique ($P_w = 0$), la pression corrigée devient:

$$P_t = P_m + P_h - P_r \quad (2.11)$$

L'interprétation des résultats, quelque soit la méthode préconisée, permet non seulement de déterminer la valeur Lugeon, mais aussi d'identifier des anomalies. La valeur trouvée permet donc de déterminer s'il est nécessaire ou non d'injecter, la valeur limite admise où l'injection est prescrite étant 1 Lu. On peut aussi estimer quel sera le débit d'injection, toutefois il faut considérer la rhéologie du coulis et le fait qu'il peut y avoir une fissure importante ou plusieurs fissures fines. Le tableau 2.2 montre les différents comportements et anomalies possibles selon les auteurs.

Essai préliminaire

L'essai préliminaire, pour sa part, est un essai semblable à l'essai exploratoire, mais simplifié. Habituellement, on teste chaque section de chaque trou et il permet [Houlsby, 1990] et [Weaver, 1991]:

- de déterminer la perméabilité de chaque section et de voir si elle correspond avec celle assumée durant la conception;
- d'identifier les fuites possibles, les communications possibles entre les différents trous ou autres anomalies;
- de vérifier si l'équipement fonctionne bien;
- de saturer le milieu à injection.

La pression recommandée par Houlsby est de 1 bar (100 kPa) ou moins si le milieu montre de trop faibles propriétés mécaniques. Il suggère aussi de prendre des lectures de débits à 5, 10 et 15 minutes et d'interpréter les résultats de la façon préconisée pour les essais d'exploration.

Essai Lefranc

L'essai Lefranc se compare à l'essai Lugeon, mais s'applique seulement aux milieux granulaires. La caractéristique de ce milieu exige d'ailleurs l'emploi d'un tube pour procéder à l'essai, qui a généralement lieu au fond du forage ou à travers une section exempte de tube. Pour réaliser l'essai, on peut appliquer une pression constante ou variable. On calcule par la suite la perméabilité en fonction de la forme de la zone étudiée et de la nature de la pression appliquée [Mnif, 1996].

Tableau 2.2 Interprétation des essais Lugeon
(Adapté de Mnif, 1996 et Ewert, 1992)

Houlsby et ISRM				Kutzner		Ewert	
Cas	Paliers de pression	Valeurs Lugeons	Courbes P-Q	Cas	Courbes P-Q	Cas	Courbes P-Q
Écoulement Laminaire				Écoulement Laminaire		Fissure fine	
Écoulement turbulent				Écoulement turbulent		Saturation	
Remplissage des vides				Remplissage des vides		Milieu perméable	
Transport de particules				Déformation élastique		Érosion	
Fracturation hydraulique				Érosion ou fissuration		Fracturation	
Dilatation						Dilatation	
Fuites à travers les obturateurs						Accumulation de débris	

2.2.3 Inspection non destructive

De plus en plus maintenant, on utilise les méthodes d'inspection non destructives pour déterminer l'emplacement, l'étendue et la profondeur des fissures ou des détériorations. Diverses méthodes existent déjà, mais pour avoir des résultats plus représentatifs, il est suggéré d'utiliser plusieurs méthodes pour inspecter une structure. Les méthodes non destructives les plus communes pour la détection de fissures ou détériorations internes sont:

- *marteau*: cette méthode consiste à écouter le son qu'émet chacun des coups. Un son sourd indique habituellement une délamination ou une fissure [ACI, 1984];
- *demi-pile* (ASTM C876): la demi-pile de cuivre-sulfate de cuivre est la plus utilisée pour déterminer le potentiel de corrosion de l'armature à l'origine de certains problèmes de fissuration [ACI, 1984];
- *méthodes électromagnétiques*: il est possible de transmettre des ondes électromagnétiques (ondes radars) dans une masse de béton et d'enregistrer leurs réflexions pour déterminer la présence de fissures ou de délaminations. Un système de ce type inclut une unité de contrôle, une antenne à transmission et à réception, un oscillographe et une source d'énergie. Chaque onde réfléctie atteint l'antenne à un temps différent. Ce temps d'arrivée dépend d'ailleurs de la profondeur de l'interface et de la constante diélectrique du matériau qui a causé la réflexion; [Hassani et al., 1996]
- *méthode par thermographie infrarouge*: cette méthode est basée sur le principe stipulant que la propagation de la chaleur est affectée par les anomalies à l'intérieur d'un matériau. Ces défauts perturbent la circulation de la chaleur, ce qui provoque des différences de température à la surface. Ainsi, en mesurant la température à la surface, il est possible de détecter des délaminations ou autres anomalies, mais il est par contre impossible de déterminer la profondeur ou l'épaisseur d'une fissure; [Hassani et al., 1996]
- *méthodes nucléaires*: l'utilisation des méthodes nucléaires pour l'inspection non destructives est relativement récente. On assiste à une croissance de l'utilisation de ces méthodes pour trouver des défauts dans les structures de béton. Le fait que les endroits denses absorbent une plus grande portion de la radiation que

les endroits moins denses est le principe à la base de ces méthodes. La radiographie à rayons X ou à rayons GAMMA et la radiométrie sont les principales techniques employées dans le domaine de l'inspection d'ouvrages de béton; [Hassani et al., 1996]

- *méthodes à ultrasons*: ces méthodes reposent sur le principe de l'écho des ondes de propagation et de leurs temps de réception. Ainsi, en captant l'onde incidente à l'aide d'un transducteur et en mesurant le temps de voyage, il est possible de déterminer les caractéristiques des matériaux et de localiser leurs défauts. La méthode Pulse Echo et la tomographie sonique sont les deux méthodes à ultrasons les plus souvent employées dans le domaine du béton; [Hassani et al., 1996]
- *méthode Impact-Echo*: cette méthode est basée sur la propagation d'ondes de contraintes générées par un impact. Ainsi, un impact mécanique génère des pulsations (ondes de compression et de cisaillement) qui se propagent dans le matériau sous la forme d'un train d'onde hémisphérique aussi appelées ondes de front. Ces dernières sont reflétées en forme d'écho par les interfaces internes ou les bornes du spécimen. Ces échos vont produire des déplacements à la surface qui sont captés par un récepteur et enregistrés sur un oscilloscope numérique. Par la suite, on transforme cette onde du domaine du temps au domaine de fréquence à l'aide des transformations Fourier discrète (FFT). Il devient alors possible en analysant le spectre des amplitudes de fréquences captées d'identifier les fréquences dominantes de l'onde de compression servant à calculer la profondeur des anomalies; [Hassani et al., 1996]

2.3 Fissuration des barrages

La fissuration, inévitable dans les structures de béton, se manifeste sous diverses formes (verticales, horizontales, orthogonales, etc.) autant sur les barrages poids que sur les barrages voûte et est le signe que ces barrages réagissent aux changements provoqués par les variations volumétriques ou par les diverses charges vives ou mortes. Les fissures peuvent les affecter à différents degrés et profondeurs (à la surface, à l'intérieur ou de bord en bord) selon le type, la géométrie ou le rôle de l'ouvrage, de plus elles peuvent apparaître pendant la construction, au cours de la mise en eau initiale ou durant l'exploitation. [Boggs, 1985]

Il est donc essentiel, peu importe le type ou la taille de la structure hydraulique, de suivre son comportement pour identifier le plus tôt possible les causes de tous désordres potentiels pour une gestion sécuritaire et efficace de l'ouvrage. Pour ce faire, on doit [Carrere et al.,1985]:

- instrumenter l'ouvrage:
 - basemètres
 - pendules
 - piézomètres
 - fissuromètres
 - etc.;
- effectuer des recherches et des analyses en laboratoire:
 - ciment
 - matériaux de construction
 - eaux
 - méthodes de réparation
 - matériaux de réparation
 - etc.;
- effectuer des essais et des mesures in situ:
 - inspections visuelles
 - carottages
 - mesures des contraintes
 - mesures des débits de fuite
 - etc.

Exemple du barrage Daniel-Johnson [Saleh et Lapointe, 1996]

À titre d'exemple, les fissures les plus importantes du barrage Daniel-Johnson peuvent être répertoriées selon leur type: contact roc-béton, oblique, parallèle ou plongeante (Figure 2.10).

Fissures au contact roc-béton

Le décollement du contact roc-béton, que l'on doit colmater dès qu'il est constaté pour éviter des infiltrations résultant en des sous-pressions pouvant causer un éventuel soulèvement, provient:

- de l'hétérogénéité du roc et du béton;
- des pressions hydrostatiques au niveau de la fondation;
- de la conception du barrage qui sollicite le contact roc-béton en traction.

Fissures obliques

Ces fissures, comme leur nom l'indique, sont des fissures horizontales en clef de voûte qui s'inclinent progressivement jusqu'aux appuis. Leur origine structurale est liée à la géométrie du barrage et aux mouvements occasionnés par le cyclage thermique. Elles sont situées dans la partie inférieure des voûtes du côté aval. Les fissures obliques ont été observées dans les voûtes 5-6 et 7-8. Des infiltrations et des suintements par certaines de ces fissures ont laissé des dépôts de calcite après assèchement.

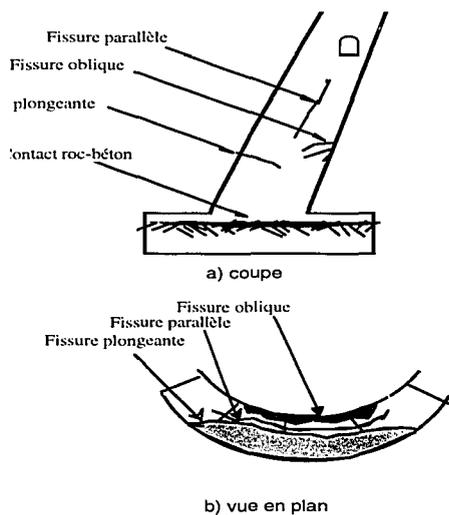


Figure 2.9 Types de fissuration du barrage Daniel-Johnson (Saleh et Lapointe, 1996)

Considérant l'origine thermique des fissures obliques dans le barrage, la réalisation d'un confortement thermique au bas des voûtes du côté aval du barrage a été la solution retenue pour arrêter la progression de ces fissures. Des abris ont été installés pour protéger le bas de 9 des 13 voûtes sur une hauteur d'une trentaine de mètres. La température à l'intérieur des abris était maintenue entre 10 et 15°C durant l'hiver au moyen de fournaies électriques.

D'ailleurs dès la mise en place des abris, on a remarqué une nette diminution de la progression de la fissuration du parement aval. On évalue à 90 % la diminution du taux moyen de fissuration par rapport à celui observé par le passé.

La cause de l'apparition et de la propagation des fissures obliques de la voûte 5-6 a été mise à jour suite à une analyse par éléments finis réalisée en 1981, qui a permis de déterminer que la partie inférieure du parement aval de la voûte était en traction ce qui correspondait à la fissuration oblique.

Fissures parallèles

Ces fissures sont situées à l'intérieur de la structure dans un plan plus ou moins parallèle aux faces des voûtes ou des contreforts. Elles résultent d'une rupture du béton caractérisée par un claquage ou par des éclats de béton trouvés après la rupture. Trois fissures de ce type ont été découvertes soit dans les voûtes 3-4, 5-6 et 7-8. Souvent ces fissures sont liées à la géométrie du barrage, aux matériaux de construction, à l'état de contrainte, etc. et peuvent compromettre l'intégrité de l'ouvrage. De plus, elles sont difficiles à détecter et il arrive souvent qu'elles soient déjà à un état avancé lors de leur détection. C'est pourquoi, il importe de les réparer ou de les instrumenter pour suivre leur propagation.

Fissures plongeantes

Les fissures plongeantes sont habituellement détectées par une augmentation du débit d'infiltration dans les zones où elles apparaissent, en particulier dans les drains de parement amont en contact avec la fissure. Les fissures plongeantes coupent le pied des voûtes plus ou moins perpendiculairement au parement amont et plongent vers l'aval. Elles sont habituellement centrées sur les plots en clé de voûte et peuvent atteindre une superficie de près de 450 m². Elles sont toutes situées près de la zone du blocage à l'exception de la fissure plongeante de la voûte 4-5 qui se trouve par endroit à 8 m du blocage (cette dernière n'est pas reconnue comme une fissure plongeante par certains spécialistes d'Hydro-Québec). L'ouverture de ces fissures se situe entre 0 et 15 mm.

Les fissures plongeantes, comme l'ont démontré les études structurales antérieures, résultent de la géométrie du barrage qui induit une résistance à la compression insuffisante à la base des voûtes. L'inclinaison des voûtes et des contreforts fait en sorte que le poids propre de l'ouvrage et la poussée hydrostatique sont transmis par effet d'arcs, en grande partie, aux contreforts et faiblement à la base.

3.0 Injection

3.1 Méthodes de réparation du béton

On sait que tous les éléments ou toutes les structures de béton peuvent se fissurer. Les fissures sont souvent bénignes, mais il arrive qu'elles affectent [Mailvaganam, 1991]:

- l'esthétique;
- l'étanchéité;
- la durabilité;
- l'intégrité structurale.

C'est d'ailleurs pour ces raisons qu'on décide de réparer le béton fissuré, mais avant de procéder à des réparations, il est impératif de déterminer [Mailvaganam, 1991]:

- la cause de la fissuration;
- le but de la réparation;
- la condition de la fissure (active, morte ou progressive);
- le mode d'occurrence;
- la direction et l'importance des futurs déplacements;
- l'environnement (micro et macro);
- les effets de la réparation sur toute la structure.

Il existe plusieurs techniques de réparation qui doivent être choisies selon les caractéristiques de chaque fissure et de leur milieu. Dans certains cas, il peut même arriver que l'utilisation de plusieurs techniques deviennent nécessaires. Voici quelques techniques de réparation de fissures [Mailvaganam, 1991]:

- le calfatage;
- l'épinglage;
- l'ajout d'armature;
- le «drypack»;
- les traitements de surface et les revêtements;
- l'injection;

Calfatage

Cette méthode très simple, utilisée pour réparer des fissures de surface mortes non structurales, consiste à élargir la fissure exposée de manière à la sceller en la remplissant avec un produit adéquat, comme un polyuréthane, un époxy ou un ciment. La technique est

illustrée à la figure 3.1 [ACI, 1984].

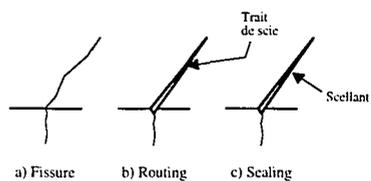


Figure 3.1 Calfatage (ACI, 1984)

Épingleage

Cette méthode peut être envisagée pour réparer des fissures majeures dans des membrures sollicitées en traction. La procédure exige que l'on fore des trous de chacun des côtés de la fissure, de les nettoyer et d'y insérer des barres d'ancrage en «U», qui seront ancrées avec un coulis à retrait compensé ou avec un époxy. Il est important de se rappeler que cette technique, illustrée à la figure 3.2, ne permet pas de refermer ou de sceller une fissure, il ne fait qu'empêcher sa propagation. Alors, il faut la sceller avant d'utiliser ce mode de réparation.

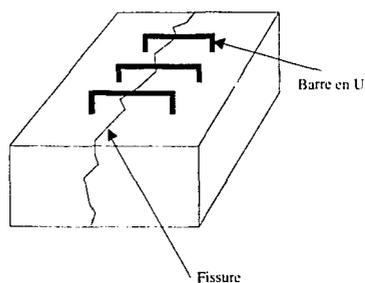


Figure 3.2 Épingleage (ACI, 1984)

Ajout d'armature

Armature conventionnelle

Lorsque l'on répare une fissure à l'aide de cette technique, il faut d'abord sceller temporairement la fissure en surface, ensuite on doit forer des trous qui vont croiser la fissure à environ 90° pour ensuite y insérer des barres d'armature. L'étape suivante consiste à injecter

le tout pour ancrer l'armature et remplir la fissure. De cette manière, la membrure de béton retrouve son intégrité. La figure 3.3 montre une membrure réparée avec cette technique. [Mailvaganam, 1991]

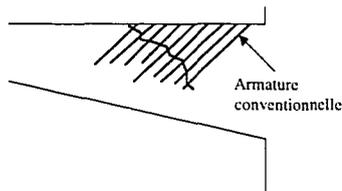


Figure 3.3 Ajout d'armature conventionnelle (ACI, 1984)

Armature précontrainte

La technique de l'armature précontrainte est préconisée pour solidifier des membrures ou pour refermer la fissure. On utilise de barres ou des câbles pour comprimer la membrure à réparer, comme on le voit à la figure 3.4. Il faut être prudent lorsqu'on utilise cette technique pour ne pas déplacer ou créer des fissures ailleurs dans la structure. [ACI, 1984]

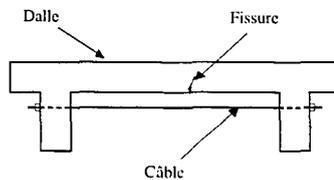


Figure 3.4 Ajout d'armature précontrainte (ACI, 1984)

«Dry pack»

Avant d'utiliser cette méthode de réparation, il faut d'abord élargir la fissure à environ 25 mm de largeur et la nettoyer. Ensuite, on peut enduire la fissure d'une couche de coulis ou d'agent de liaisonnement juste avant d'appliquer le mortier dense de très faible rapport E/C, qui est par la suite martelé pour le compacter.

Traitement de surface et revêtement

On peut aussi réparer les fissures fines stabilisées en enduisant le béton fissuré d'une couche de produit de réparation ou un revêtement. Une large gamme de produits, allant du traitement très mince purement esthétique aux membranes très épaisses, sont disponibles sur le marché.

L'injection est aussi une méthode de réparation très prisée. Elle sera étudiée plus en détails dans les sections qui suivent.

3.2 Types d'injection

L'injection est une méthode de réparation qui consiste à injecter du coulis, un produit qui durcira dans des cavités, dans le sol ou dans des fissures dans le but d'améliorer les caractéristiques du milieu injecté, i.e. augmenter sa résistance ou son imperméabilité [Nonveiller, 1989]. Le concept en lui-même est très simple: on fore des trous que l'on remplit avec du coulis sous pression. La figure 3.5 illustre le procédé. Par contre, certains auteurs comme Housby considèrent que, même si cette technique fait partie de l'ingénierie, elle tient plus de l'art. En effet, durant une injection, il est pratiquement impossible de suivre directement la pénétration puisqu'on ne peut pas voir ce qui se passe. [Housby, 1990]

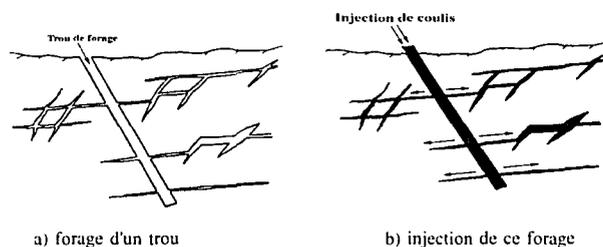


Figure 3.5 Trou de forage interceptant des fissures (Housby, 1990)

Outre la réparation de fissures dans le béton, le sujet du prochain chapitre, on peut utiliser l'injection à d'autres fins, notamment pour [Housby, 1990]:

- réduire la perméabilité des fondations des barrages;
- prévenir l'érosion des sols de la fondation;
- augmenter la résistance du sol sous les fondations;
- assister la construction des tunnels et des mines;

- remplir les joints de construction entre des masses de béton;
- réparer les effets de la subsidence sous les structures;
- bétonner dans des endroits difficiles d'accès;
- remplir des ancrages dans le sol, le roc ou le béton;
- fixer les câbles de précontraintes;
- remplir des cavités que le béton n'a pu remplir.

L'injection d'un milieu pulvérulent (sol), d'un milieu rocheux ou d'une structure se ressemblent en plusieurs points, bien que ces milieux aient des caractéristiques passablement différentes.

Par exemple, les milieux pulvérulents sont surtout caractérisés par un pourcentage élevé de vide d'environ 20 à 35 % et le succès de l'injection de leur injection repose surtout sur le choix judicieux du produit le plus apte à remplir ces vides. Quant aux milieux rocheux, caractérisés par un pourcentage de vide dépassant rarement les 5 % et par une perméabilité presque nulle, ils sont généralement des milieux plus ou moins homogènes comportant des discontinuités (fissures ou cavités) qu'il faut injecter. L'injection du béton se rapproche beaucoup de celle des milieux rocheux. En fait, le béton est considéré comme un milieu rocheux assez homogène traversé de discontinuités souvent identifiées et localisées précisément.

Par contre, peu importe le type d'injection, les principales phases sont:

- investigation:
 - inspection visuelle;
 - inspection destructive
 - inspection non destructive;
- décision d'injecter ou non;
- conception:
 - distribution des trous de forage;
 - arrangement des sections;
 - méthode;
 - préparatifs;
- contrat;
- forage;
- préparation du chantier;
- équipement:
 - malaxeur;
 - agitateur;
 - pompe;
 - boyaux;

- instruments de lecture et système d'acquisition de données et de contrôle (pression, débit ou de déplacement);
 - tête d'injection;
 - obturateur;
- essai d'eau préliminaire:
 - mesurer la perméabilité;
 - indiquer les troubles potentiels;
 - trouver les infiltrations et les fuites;
 - début de l'injection:
 - recette initiale;
 - détection des problèmes possibles;
 - révision possible de la recette;
 - suivi en temps réel:
 - débit;
 - pression;
 - anomalies;
 - fin de l'injection;
 - analyse postmortem;
 - contrôle de la qualité;
 - évaluation de la performance à long terme.

3.3 Qu'arrive-t-il durant l'injection?

Évidemment, le coulis d'injection ne circule pas comme l'eau dans les fissures. En effet, la plupart des coulis (chimiques ou à base de ciment) ont soit des particules et/ou une viscosité plus élevée que l'eau. Les facteurs qui influencent le plus la pénétration sont la thixotropie ainsi que la viscosité et la cohésion du coulis. Ceux-ci seront expliqués en détail dans le prochain chapitre.

Dans la partie qui suit, on traite de la facilité avec laquelle on peut injecter des fissures d'ouverture appréciable ou des fissures beaucoup plus fines.

3.3.1 Fissures d'ouverture appréciable

Les fissures d'ouverture appréciable (plus de 2 mm) ne peuvent pas être toutes injectées avec la même aisance. En fait, on peut les séparer en fissures horizontales, inclinées ou verticales (Figure 3.6).

Des trois types, ce sont les fissures inclinées et verticales qui sont le plus facile à injecter puisqu'elles agissent en quelque sorte comme des drains. La pénétration du coulis est ainsi facilitée étant donné que l'eau et le coulis plus maigre peuvent être déplacés vers le haut et remplacés par du coulis plus épais. Les fissures presque horizontales n'offrent pas cet

avantage, c'est pourquoi elles sont les plus difficiles à injecter. Au début, le coulis peut bouger sans encombre sous l'influence de la pression dans le trou. Par contre, à mesure que le coulis s'éloigne du trou d'injection, l'influence de la pression s'amenuise et la pénétration devient de plus en plus difficile. Éventuellement, la limite de la pénétration du coulis sera atteinte quand la pression ne sera plus capable d'induire quelque mouvement que ce soit (Figure 3.7). Le dépôt de coulis à cette limite est de mauvaise qualité et ressemble à un delta de fleuve, i. e. qu'il est rempli de méandres et de cordons d'eau. Pendant ce temps, le coulis continue à entrer dans la fissure, mais ceci laisse peu de chance à l'eau de ressuage de s'évacuer. Comme le coulis ne bouge presque plus, il commence donc à durcir et l'eau de ressuage s'en sépare, mais elle n'a pas de place pour s'échapper verticalement, elle doit s'échapper latéralement, ce qui crée ces méandres et ces cordons. Habituellement, cette situation résulte en une injection dont la durabilité et l'adhérence à la partie supérieure laissent à désirer.

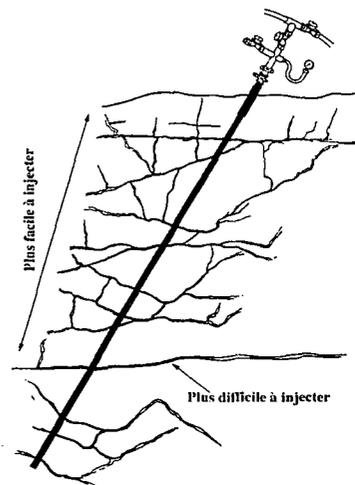
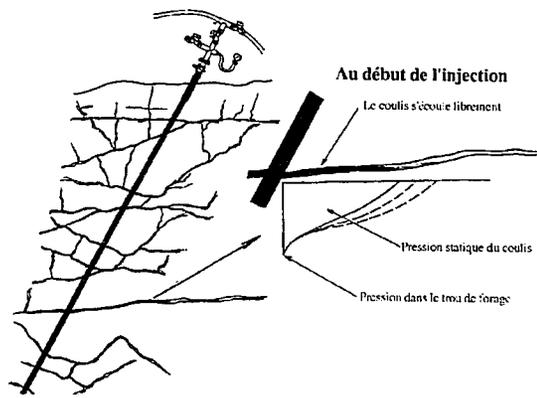
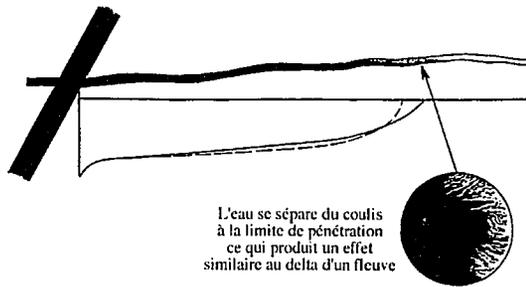


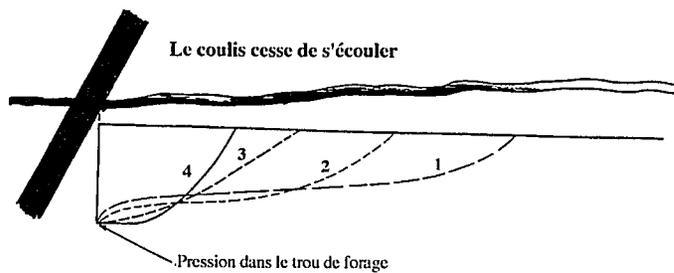
Figure 3.6 Fissures horizontales et fissures verticales (Houlsby, 1990)



a) Pénétration initiale



b) Pénétration maximale



c) Arrêt de la pénétration

Figure 3.7 Injection d'une fissure horizontale (Houlsby, 1990)

Quant aux fissures plus verticales, où le drainage est possible, le coulis se propage généralement de façon radiale en suivant le trajet qui offre le moins de résistance. Les parties les plus ouvertes sont donc remplies en premier et une fois que celles-ci sont pleines de coulis, les fissures plus fines vont commencer à se remplir à leur tour. C'est pourquoi qu'habituellement les fissures plus ouvertes sont mieux injectées et qu'il est important que le rayon d'action de chacune des injections se chevauche pour s'assurer d'une réparation de qualité.

3.3.2 Fissures fines

Les fissures fines, des fissures d'ouverture de moins de 1 mm, peuvent aussi être injectées. Pour ces injections, il est souvent prescrit d'utiliser des produits chimiques qui ne contiennent pas de particules libres qui nuisent à la pénétration, cependant des coulis à base de ciment Portland ou mieux encore des coulis à base de ciment microfin peuvent aussi être injectés. Dans ces deux derniers cas, il est impératif d'utiliser des coulis de haute qualité obtenus en ajoutant des superplastifiants et en les mélangeant avec des malaxeurs à haute énergie.

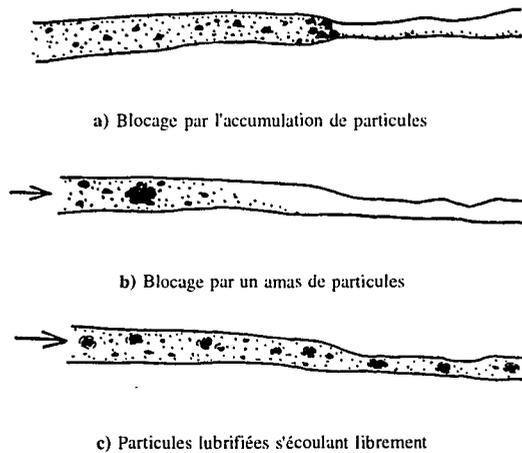


Figure 3.8 Particules s'écoulant dans une fissure (Houlsby, 1990)

Dans le cas des coulis chimiques exempts de particules, ceux-ci vont s'écouler au sein de la fissure fine comme le ferait l'eau, sauf qu'ils vont offrir plus de résistance à cause de leur viscosité plus élevée. Les coulis à base de ciment vont, pour leur part, circuler librement jusqu'au moment où des grains s'accrochent sur une des parois de la fissure qui devient plus fine. Par la suite, d'autres grains aussi gros s'accumuleront derrière pour ainsi résulter en un blocage. La même chose peut se produire si un amas de grains circule dans une fissure qui rétrécit. La figure 3.8 illustre ces phénomènes qui sont causés par les surfaces rugueuses des gros grains qui causent l'«interlocking», qui peut être évité si chacun des grains est enduit d'une couche d'eau adsorbée. Dorénavant, les grains de ciment ne peuvent pas se toucher directement ce qui évite l'«interlock». Le fait d'utiliser un malaxeur à haute énergie et des superplastifiants va résulter en cette couche de lubrifiant qui aide à repousser les grains des parois des fissures et à réduire aussi les chances qu'ils s'y accrochent.

3.4 Facteurs affectant la pénétration

3.4.1 Caractéristiques de la fissure

L'ouverture de la fissure à injecter influence d'abord le choix du coulis. En effet, ce n'est pas tous les coulis qui sont aptes à colmater des fissures très fines. Il est d'ailleurs suggéré d'utiliser des ciments microfins pour injecter de fissures de moins de 0,5 mm. L'ouverture est aussi responsable d'une importante perte de charge: plus la fissure est fine, plus la pression d'injection va diminuer rapidement.

L'ondulation, la sinuosité, la rugosité et l'irrégularité des fissures affecte aussi la pénétrabilité. Ce facteur provoque aussi une perte de charge ce qui amène le coulis à se déposer plus rapidement que prévu.

Il peut arriver que le béton à réparer soit poreux et qu'il absorbe une partie de l'eau du coulis, ce qui a pour effet d'augmenter sa viscosité ainsi que sa cohésion et donc de diminuer sa pénétration. On peut résoudre ce problème en utilisant des coulis de rapport E/C un peu plus élevé ou de simplement saturer le béton en procédant à un essai d'eau juste avant l'injection. [Weaver, 1991]

3.4.2 Propriétés des coulis

Viscosité

La viscosité est définie comme étant la résistance interne d'un fluide au mouvement. Cette résistance peut être provoquée par des effets mécaniques, comme l'«interlock» des particules ou par des effets électrochimiques, comme l'attraction et la répulsion des particules.

La viscosité est d'ailleurs le facteur qui limite la pénétration des coulis chimiques. En fait, plus ils sont visqueux, plus la pénétration est difficile. Par contre, pour les coulis à base de ciment, il y a plus qu'un facteur, dont la thixotropie, qui affecte la pénétration, la viscosité en est certes un, mais les autres sont tout aussi important sinon plus.

Mesurer la viscosité des coulis de ciment n'est pas facile, celle-ci peut varier selon la température, le temps passé après le malaxage, le type de ciment ou le rapport Eau/Ciment. Certains vont même jusqu'à suggérer qu'il n'est pas vraiment nécessaire de la mesurer en chantier, si ce n'est que pour s'assurer d'une certaine uniformité du coulis. [Houlsby, 1990]

Cohésion

D'ailleurs, c'est surtout le caractère thixotropique des coulis qui gouverne leur pénétration. Ce concept est assez difficile à expliquer, on peut l'illustrer avec l'exemple suivant. Durant une injection d'eau ou de coulis, si celle-ci est arrêtée, la pression va diminuer et l'écoulement va s'arrêter. Par la suite, lorsqu'on rapplique la pression en repartant l'injection, l'eau se remet à s'écouler immédiatement puisqu'elle n'est aucunement thixotropique, alors que le coulis, de son côté, exige qu'une pression substantielle ne se bâtisse avant de recommencer à s'écouler, ce qui caractérise un comportement thixotropique. Ainsi à l'instant où la pression d'injection n'agit plus sur le coulis, celui-ci devient comme une sorte de pâte et dès que la pression redevient suffisante, le coulis retrouve sa forme liquide.

Pour caractériser adéquatement ces propriétés, il faut déterminer le taux de déformation, appelé taux de cisaillement, lorsqu'une contrainte de cisaillement est appliquée. La pente de la courbe ainsi tracée est la viscosité (μ). De cette manière, lorsqu'une déformation apparaît dès que la contrainte est appliquée, on parle alors d'un comportement uniquement visqueux de type Newtonien, comme c'est le cas pour l'eau ou pour la plupart des coulis chimiques, des fluides qui ont une viscosité constante à une température donnée. Dans le cas des fluides thixotropiques, avant qu'une déformation n'apparaisse, il faut dépasser un seuil limite, le «seuil Binghamien, mais une fois ce seuil franchi ces fluides Binghamiens vont

se comporter à la manière des fluides Newtoniens. Certains auteurs font référence au seuil Binghamien comme étant la cohésion, une analogie provenant de la géotechnique. Cependant, d'autres fluides vont se comporter différemment, on parle des fluides viscoplastiques. Ceux-ci, après avoir franchi le seuil de cisaillement limite, n'auront pas un comportement Newtonien, i.e. que la viscosité n'est pas constante. La plupart des auteurs ne font pas de différence entre ces deux derniers types de fluides, c'est la raison pour laquelle on fait référence aux coulis de ciment comme étant des fluides Binghamiens. La figure 3.9 représente le comportement des trois types de fluides. [Weaver, 1991]

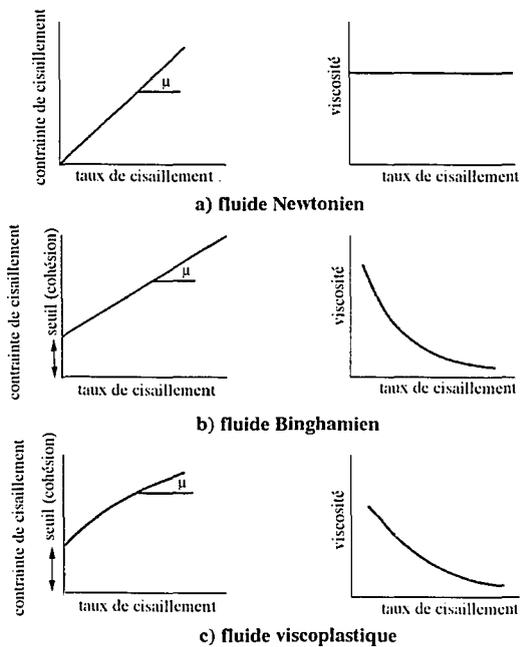


Figure 3.9 Types de fluides (Weaver, 1991)

Pour expliquer et illustrer les effets de la viscosité et de la cohésion, on peut tirer profit d'une approche pratique et d'une approche théorique. Housby se sert d'un exemple concret pour démontrer l'importance de ces phénomènes. [Housby, 1990] En fait, il a choisi l'exemple d'un coulis de ciment où la pression est suffisante pour permettre l'écoulement dans la fissure. Ces conditions persistent jusqu'au moment où la vitesse d'écoulement diminue au

fur et à mesure que la pression diminue. Ainsi, la contrainte de cisaillement diminue sous le seuil de cisaillement limite et le coulis prend alors la forme d'un gel et la pression n'y est plus transmise. Ceci n'est pas très grave si l'injection prend fin à ce moment, mais pour diverses raisons s'il fallait la reprendre, ce comportement pourrait créer des problèmes: il pourrait s'en suivre que la pression exercée ne soit pas suffisante pour que le coulis redevienne liquide. Il fait aussi référence aux cas où des fissures d'ouvertures variables sont injectées. Le coulis va pénétrer toutes les fissures, mais les fissures les plus ouvertes constituant un trajet privilégié absorbent plus de coulis de même que la majeure partie de la pression. Par conséquent, le débit de coulis dans les fissures plus fines diminue après une pénétration partielle, ce qui pousse le coulis à prendre la forme d'un gel. Plus tard, quand les fissures les plus ouvertes auront été toutes remplies et que ce serait au tour des fissures plus fines à recevoir leur part, il peut arriver que le coulis soit déjà devenu trop rigide et donc impossible à mouvoir, ce qui laisse incomplète l'injection de ces fissures. Pour sa part, Lombardi [1985] préconise une l'approche plus théorique pour expliquer l'action de la cohésion et la viscosité sur la pénétration. D'après lui, la cohésion est la cause de la formation d'un noyau rigide d'écoulement qui diminue grandement la pénétration et la force de soulèvement créée durant l'injection. La figure 3.10 montre le profil de la vitesse pour des écoulements Newtoniens et Binghamiens.

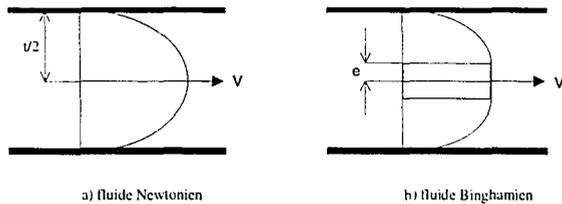


Figure 3.10 Profil de la distribution de la vitesse d'écoulement

Lombardi a modifié les équations d'écoulement d'un fluide dans une conduite circulaire pour les adapter à un joint plat, ce qui rejoint plus les conditions d'une fissure. L'équation de la demi-épaisseur du noyau, qui limite l'écoulement, est:

$$e = \frac{c}{\gamma \cdot J} \quad (3.1)$$

- où
- e : demi-épaisseur du noyau rigide (m)
 - c : seuil de cisaillement ou cohésion (N/m²)
 - γ : poids spécifique du coulis (N/m³)
 - J : gradient hydraulique

On remarque ainsi que la demi-épaisseur est directement proportionnelle à la cohésion du coulis. Les fluides Newtoniens ne démontrant pas de cohésion réagissent immédiatement à l'application de la pression puisque aucun noyau rigide ne s'est formé. Cependant, comme il y a formation d'un noyau rigide chez les fluides Binghamiens, qui ont une cohésion toujours supérieure à 0, il faut donc une certaine pression pour parvenir à le mouvoir pour ensuite induire une déformation (mouvement) au coulis. Lombardi s'est aussi attardé à trouver une relation pour déterminer théoriquement le rayon maximal de pénétration des coulis stables supposant que la fissure non inclinée a des parois rugueuses et sèche. Ce rayon devient:

$$R_{\max} = \frac{P_{\max} \cdot t}{c} \quad (3.2)$$

où R_{\max} : rayon maximal de pénétration (m)
 P_{\max} : pression maximale admissible (N/m^2)
 t : demi-épaisseur de la fissure (m)
 c : seuil de cisaillement ou cohésion (N/m^2)

On y remarque que la pénétration est inversement proportionnelle à la cohésion. Théoriquement, un fluide Newtonien pourrait se propager indéfiniment. De plus, on remarque que pour atteindre le même rayon de pénétration, des pressions plus élevées sont nécessaires si on injecte des coulis de cohésions plus grandes.

Lombardi traite aussi des effets de la cohésion sur les forces de soulèvement créées au sein de la fissure. À partir du rayon maximal de pénétration et de la pression maximale, il définit la force de soulèvement comme suit:

$$F_{\max} = \frac{\pi \cdot P_{\max}^3 \cdot t^2}{3 \cdot c^2} \quad (3.3)$$

où F_{\max} : force de soulèvement maximale (N)
 P_{\max} : pression maximale admissible (N/m^2)
 t : demi-épaisseur de la fissure (m)
 c : seuil de cisaillement ou cohésion (N/m^2)

Il en ressort que la pression crée des forces beaucoup plus importantes dans le cas des fluides Newtoniens vu qu'ils ne possèdent pas la cohésion pour atténuer ces effets souvent indésirables de la pression, ces forces sont même théoriquement infinies. On constate donc qu'il est important de contrôler la cohésion pour éviter de fracturer davantage la structure que l'on injecte.

Stabilité

L'eau joue un rôle paradoxal dans la formulation des coulis de ciment. Elle est absolument nécessaire pour le transport et l'hydratation des grains de ciment; par contre, le transport exige une quantité d'eau beaucoup plus grande que celle nécessaire à l'hydratation et ce surplus est néfaste une fois le coulis déposé. En effet, dès que la vitesse de propagation du coulis diminue suffisamment, les particules commencent à se déposer et l'eau de ressuage remonte. [Houlsby, 1990] Ce phénomène est important puisqu'il affecte grandement le résultat final de l'injection de la fissure. Ainsi, l'eau en surplus qui n'est pas absorbée par la masse de béton environnante, qui n'est pas retenue dans la structure cristalline et qui ne prend pas part à l'hydratation des particules de ciment résulte en un coulis de piètre qualité à la surface. Ce coulis est habituellement poreux, perméable, facilement lessivable et donc très peu durable.

Plusieurs facteurs influencent la stabilité des coulis. En effet, les particules grossières, qui requièrent plus d'énergie pour se déplacer, se déposent plus rapidement que les particules qui restent beaucoup plus longtemps en suspension. C'est pourquoi, les coulis de ciment microfin sont plus stables que les coulis de ciment Portland.

Les particules solides dans un coulis de ciment se déposent à un taux directement proportionnel à la différence entre la gravité spécifique de la particule et la gravité spécifique du coulis. Conséquemment, des coulis qui contiennent des particules de faible densité, comme les cendres volantes, sont plus stables que ceux faits à partir de particules denses, comme le sable. [Weaver, 1991]

Le rapport E/C influence grandement la stabilité des coulis: plus il est élevé, plus la sédimentation est importante. L'ajout d'un superplastifiant ou d'un réducteur d'eau peut aussi entraîner une sédimentation plus importante [Saleh et Dumont, 1995].

Dans le monde de l'injection, deux écoles de pensées s'opposent: la première prône l'utilisation de coulis maigres ou instables avec des rapports E/C initiaux aux environs de 5 (vol.), et la deuxième suggère plutôt d'utiliser des coulis stables (E/C vol.< 1,5) dès le départ. La stabilité d'un coulis est définie par le pourcentage de ressuage 2 heures après le malaxage. Les coulis stables ont des avantages certains [Saleh et Lapointe, 1996]:

- des meilleures caractéristiques physiques et mécaniques;
- une meilleure injection des fissures à cause d'un ressuage moins important;

- un risque de fracturation hydraulique moins élevé lors de l'injection;
- un temps d'injection diminué à cause d'une cohésion accrue;
- une meilleure adhérence;
- un retrait moins important lors de la prise;
- une durabilité et une résistance au lessivage du coulis accrues.

Certaines personnes dans le domaine de l'injection pensent à tort qu'une pression d'injection plus élevée peut compenser en éliminant le surplus d'eau en densifiant le coulis peu compact. [Lombardi, 1985]

Granulométrie

La granulométrie, la distribution de la grosseur des particules, en plus d'influencer la sédimentation, affecte la pénétration du coulis dans les fissures fines. Il est évident qu'une particule ne peut pas pénétrer une fissure d'ouverture plus faible que son propre diamètre. Par contre, il arrive que les particules de ciment s'agglomèrent pour ainsi bloquer des fissures plus larges que leur propre diamètre. Différents auteurs ont donc essayé d'établir des critères de pénétrabilité des particules souvent en fonction de la grosseur maximale des particules (D_{max}). Le tableau 3.1 résume ces critères.

Tableau 3.1 Critères de pénétrabilité (Boudaya, 1993)

Auteurs	Ouverture minimale de la fissure
Kennedy	3 D_{max}
Morozov et Goncharov	4 à 5 D_{max}
Ruiz et Leone	0,2 à 0,4 mm
Sinclair	0,1 à 0,5 mm
Cambefort	0,15 à 0,20 mm
Houlsby	0,5 mm
Littlejohn	0,16 mm
Bruce et Millmore	0,16 mm
U.S. Corps of Engineers	1,7 D_{max}

Temps de prise

Dès que l'on mélange l'eau et le ciment, on provoque une réaction chimique responsable de la prise et du durcissement de la pâte. Le temps de prise initial correspond au temps requis pour que le coulis devienne rigide, alors que le temps de prise final correspond au temps requis pour que la pâte durcisse.

Il est primordial de connaître les temps de prise du coulis que l'on utilise: en effet, un temps de prise initial trop court peut provoquer le blocage prématuré des tuyaux ou de la fissure tandis qu'un temps de prise final trop long en présence d'eau peut résulter en un coulis de mauvaise qualité ou même mener au lessivage si le débit d'eau est suffisant. Des valeurs de 3 h pour la prise initiale et de 24 h pour la prise finale sont des limites acceptables. [Saleh et Dumont, 1995] Plusieurs facteurs affectent le temps de prise: la composition chimique, la forme cristalline des particules, la finesse, le rapport E/C, la présence d'ajouts minéraux ou d'adjuvants et la température.

La composition chimique joue un rôle important puisqu'elle affecte la réactivité du liant hydraulique; les ciments à base de laitiers sont moins réactifs que ceux à base de ciment Portland et leurs temps de prise sont donc plus longs.

La finesse des particules affecte aussi le temps de prise puisqu'elles offrent plus de surface pour les diverses réactions chimiques, ce qui explique que les coulis de ciment type 10 hydratent moins vite que ceux de type 30.

De plus, plus le rapport E/C est élevé plus le temps de prise augmente. Il en est de même pour l'utilisation des superplastifiants. On croit que ces ajouts entraînent un retard dans la formation d'hydrate et qu'ils déflocculent les grains, ce qui augmente le temps nécessaire aux hydrates pour se lier aux hydrates des particules adjacentes. [Saleh et Dumont, 1994]

La température du coulis et celle du milieu environnant influencent aussi le temps de prise. En fait, une diminution de température augmente de façon significative le temps de prise. Par exemple pour un coulis de ciment type 10 avec un rapport E/C = 0,5, le temps de prise peut passer de 7 à 17 h si la température initiale de 20°C baisse à 4°C. [Saleh et Dumont, 1994]

3.5 Moments et produits propices

Les divers éléments d'une structure, soumis à des variations de la température ou à des charges cycliques ou variables, se déforment, exigeant de celui qui les répare de déterminer à quel(s) moment(s) et quel(s) produit(s) sont les plus propices pour une injection. Pour effectuer une réparation durable et de qualité, il faut s'assurer que la fissure à être injectée n'est pas progressive puisqu'une telle réparation ne sera que temporaire; il est en effet plus facile de réparer des fissures mortes ou actives. Contrairement aux fissures actives, les fissures mortes ne requièrent pas une attention particulière quant au choix du moment pour les injecter puisqu'elles n'évoluent pas avec le temps, mais il faut tout de même s'assurer que le produit injecté ne subira pas de retrait excessif, qui pourrait provoquer un décollement au niveau du contact béton-produit de réparation, et qu'il possède des caractéristiques physico-mécaniques (résistance à la compression, résistance à la traction, module d'élasticité) suffisantes pour supporter les efforts qu'il doit subir et transmettre. La figure 3.11 illustre ces différents phénomènes.

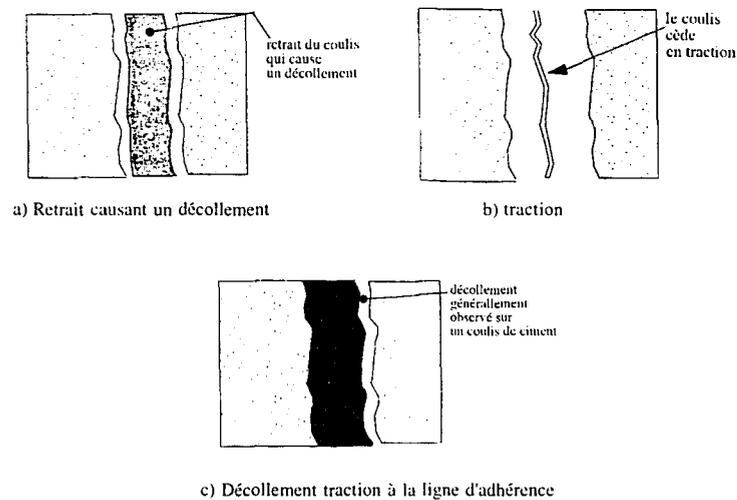


Figure 3.11 Modes de rupture des coulis d'injection (Emmonds, 1994)

Quant aux fissures actives, qui s'ouvrent et se referment selon les conditions d'exposition, on doit s'assurer, qu'en plus de choisir un produit adéquat, d'injecter ces fissures à un moment où elles sont le plus ouvertes. En effet, il arrive souvent après une injection

ayant eu lieu quand la fissure était trop refermée et lorsque celle-ci commence à s'ouvrir que le produit de réparation ou le béton environnant cède en traction. Par contre, si le produit est injecté au moment où la fissure est la plus ouverte, il pourra travailler en compression et transmettre les efforts. Ces phénomènes sont illustrés à la figure 3.12 [Emmonds, 1994].

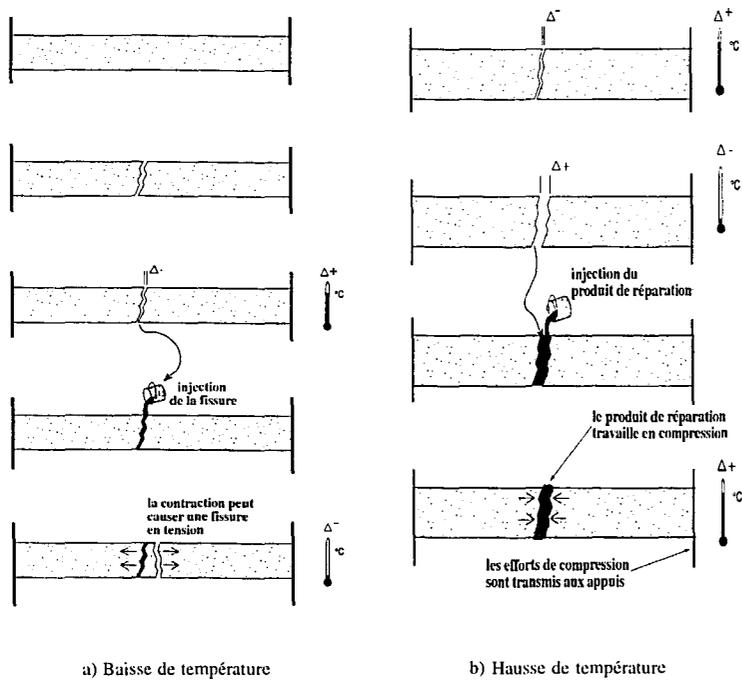


Figure 3.12 Effets de la température (Emmonds, 1994)

4.0 Injection du béton

Comme on l'a déjà mentionné auparavant, l'injection du béton est, en quelque sorte, une injection de roc modifiée. C'est d'ailleurs pourquoi, les produits, les équipements et les méthodes se ressemblent. Par contre, quand des structures de béton sont injectées, ce sont surtout les procédures et l'investigation qui varient. En effet, il est primordial d'étudier en détail la structure à réparer et d'adapter les procédures pour éviter les risques de propagation des fissures, ce qui pourrait être dangereux, voire catastrophique.

4.1 Matériaux

Le choix des matériaux dépend des conditions d'utilisation. Ainsi, l'utilisation d'un produit peut être très pertinente pour une réparation dans des conditions précises, mais tout à fait inadéquate dans d'autres circonstances. Une large gamme de produits se retrouve sur le marché et on les regroupe généralement en deux catégories: produits chimiques ou produits à base de ciment.

4.1.1 Produits chimiques

Plusieurs produits chimiques différents peuvent être utilisés durant une injection. Des produits comme les silicates de sodium, les acrylates ou les acrylamides sont susceptibles d'être envisagés pour réparer des fissures dans le béton, mais ils résultent en des coulis de faible résistance qui sont souvent affectés par l'eau ou le ciment du béton environnant. C'est pourquoi les produits les plus souvent utilisés sont les polyuréthanes et les produits à base d'époxy. Cependant, même si ces produits comportent certains avantages, leurs performances lorsqu'ils entrent en contact avec l'eau surtout à basse température, sont décevantes avec des prises qui ne sont pas garanties à moins de 5°C [Saleh et Dumont, 1995] et une viscosité qui augmente rapidement à mesure que la température diminue. Par contre, ces produits dispendieux peuvent représenter la solution optimale pour réparer des fissures fines parce qu'ils sont habituellement exempts de particules et qu'ils ont une viscosité très faible. Le produit d'injection chimique idéal aurait les caractéristiques suivantes [Karol, 1990]:

- à base de poudre soluble à l'eau pour éviter de transporter inutilement le solvant. De plus, l'eau est le solvant le moins cher qui soit;
- à prix abordable;
- non toxique;
- non corrosif;

- non explosif;
- une solution de faible viscosité qui n'augmente pas trop avec une baisse de température;
- stable à des températures normales;
- insensible aux différents sels trouvés dans l'eau souterraine et aux compositions du béton environnant;
- un pH qui s'apparente à celui du béton;
- prise possible en présence d'eau à basse température;
- haute résistance en traction, en compression et au cisaillement;
- permanent et durable;
- temps de prise contrôlable.

Évidemment, il n'existe aucun produit qui puisse répondre à toutes ces exigences, mais beaucoup de produits disponibles sur le marché peuvent posséder plusieurs de ces caractéristiques et il importe à celui qui les utilise de déterminer lesquelles sont les plus critiques et de faire son choix du produit en les respectant. Cependant, on doit utiliser ces produits avec précaution surtout dans le cas de fissures saturées d'eau à basse température, étant donné qu'ils démontrent généralement des problèmes d'adhérence aux surfaces mouillées, des problèmes de prise à des températures inférieures à 5°C et des viscosités qui augmentent rapidement au fur et à mesure que la température baisse. [Saleh et Dumont, 1995]

Depuis les débuts de l'injection de produits chimiques, de nombreux produits ont pu être utilisés comme les différentes formes de silicate de sodium, les acrylamides, les lignosulfites, les phénoplastes, les aminoplastes, etc. Cependant la majorité des ces produits ne répondent pas aux critères pour l'injection pour réparer les fissures des structures de béton: en effet, leur résistance est trop faible. C'est pourquoi dorénavant, on se concentre surtout sur les polyuréthanes ou les produits à base d'époxy.

Polyuréthane

Les polyuréthanes occupent désormais une place de plus en plus importante dans le domaine de l'injection. Ces produits sont regroupés en deux grandes catégories: les hydrophobes et les hydrophiles. Comme son nom l'indique, les produits hydrophobes absorbent très peu d'eau durant la réaction chimique, ils utilisent l'eau plutôt pour déclencher la réaction, mais ils ne l'incorporent pas au sein de leur structure chimique. Les produits hydrophiles, quant à eux, vont incorporer des molécules d'eau dans leur structure chimique pour créer un gel dont la teneur en eau peut varier. Cependant, l'eau ainsi absorbée peut

éventuellement s'évaporer si l'environnement est suffisamment sec, ce qui cause un retrait. C'est d'ailleurs pour ces raisons que l'on recommande surtout d'utiliser des produits hydrophobes pour injecter des fissures dans le béton à moins d'être absolument certain d'un taux d'humidité élevé. D'ailleurs, les hydrophobes peuvent agir dans toutes les situations où le font les hydrophiles, ce qui les rend plus versatiles. [Webac, 1996]

Les produits des deux catégories se retrouvent sous la forme d'une mousse ou d'un gel de viscosité moyenne qui ont tendance à prendre de l'expansion. Leur résistance en traction varie de faible à modérée. Ces produits, qui ne redonnent aucunement l'intégrité structurale à l'ouvrage réparé et qui peuvent présenter à long terme beaucoup des problèmes de dégradation, sont surtout utilisés pour étanchéiser les structures.

Produits à base d'époxy

Les produits à base d'époxy, contrairement aux polyuréthanes, peuvent être utilisés non seulement pour étanchéiser mais aussi pour redonner une certaine part de l'intégrité structurale. Plusieurs types d'époxy existent, mais ils ne peuvent pas tous être utilisés comme produit d'injection. La norme ASTM C881-90 les classe d'ailleurs selon leur type, leur grade et leur classe. Le type définit l'utilisation possible, le grade, la viscosité et la classe, la température d'utilisation. Les caractéristiques de ces produits varient énormément, mais il est préférable d'avoir une faible viscosité pour une meilleure pénétrabilité à des pressions qui ne seront pas trop élevées. Il est nécessaire, si on veut redonner une certaine intégrité structurale, de vérifier que la résistance à la traction et que l'adhérence soient suffisantes. Ces produits sont particulièrement efficaces pour réparer des fissures très fines, mais leur prix demeure assez élevé.

4.1.2 Produits à base de ciment

Le prix élevé et le rendement plutôt décevant à basse température des produits chimiques les rendent souvent moins attrayants pour effectuer des réparations à plus grande échelle. Pour leur part, les produits à base de ciment performant bien à basse température et représentent souvent les produits les mieux adaptés. Ces produits sont regroupés en deux grandes catégories: les ciments et les ciments microfins.

Ciments Portland

Les ciments sont des liants hydrauliques, ce qui signifie qu'ils réagissent avec l'eau pour former des hydrates qui vont durcir et qui vont rester stables en présence d'eau. Au

Canada et à travers le monde, on classe généralement les ciments selon leur composition et leur mouture.

L'injection de ces produits consiste souvent en l'alternative la moins dispendieuse. De plus, ces coulis ont des caractéristiques similaires à celle du béton. Ils ne sont pas particulièrement fins avec des finesses Blaine variant de 300 m²/kg pour le type 10 jusqu'à 400 m²/kg pour le type 30 et une grosse moyenne se situant entre 11 et 20 microns. Les ciments peuvent être utilisés sans problème pour injecter des fissures de plus de 0,5 mm et, moyennant une attention particulière et des utilisateurs expérimentés, il est possible d'injecter des fissures jusqu'à 0,3 mm d'ouverture. [Saleh et Dumont, 1995]

Ciments microfins

Pour injecter des fissures très fines, une alternative aux produits chimiques est apparue au cours des années 80, les ciments microfins. Les grains de ces ciments doivent avoir une grosseur maximale (D₁₀) d'au plus 10 microns et une grosseur moyenne (D₅₀) qui se situe entre 3 et 8 microns ainsi qu'une finesse Blaine de plus de 600 m²/kg. Ce type de ciment se divise en deux catégories: les produits à base de ciment Portland et les produits à base de laitiers de hauts fourneaux.

Les produits à base de ciment Portland sont des ciments Portland broyés plus finement. L'autre catégorie englobe les produits qui résultent d'un mélange de laitier de hauts fourneaux, des résidus de la fabrication de la fonte, et un autre matériau d'activation. En effet les laitiers, n'étant pas des liants hydrauliques malgré une composition chimique qui se rapproche de celle du ciment Portland, on doit ajouter une certaine quantité de chaux (CaO) pour les activer. Cette source de chaux peut provenir de la chaux pure, du gypse, du calcaire ou du ciment Portland. Les laitiers activés sont toutefois moins réactifs que le ciment.

4.1.3 Ajouts et adjuvants

Ajouts minéraux

Les ajouts minéraux, aussi appelés pouzzolanes, sont des silicates ou des aluminosilicates qui ne sont pas cimentaires en eux-mêmes, mais qui vont réagir avec la chaux et l'eau pour produire des composés cimentaires. Ces ajouts rendent les coulis plus imperméables, moins solubles et plus résistants aux attaques chimiques des eaux de faibles pH ou des sulfates. Ils peuvent jouer deux rôles différents: ils peuvent améliorer la qualité du coulis, mais ils peuvent aussi tout simplement remplacer une certaine quantité de ciment. En

effet, ils sont moins dispendieux et lorsqu'on les utilise dans une proportion plus élevée que le ciment, ils servent de «fillers». Ces produits se retrouvent à l'état naturel, comme les cendres volcaniques, la vitre volcanique ou la diatomite, mais ils sont rarement utilisés sous cette forme. La plupart du temps, ce sont des ajouts minéraux artificiels qu'on incorpore aux bétons et aux coulis, tels [Weaver, 1991]:

- les cendres volantes, une poudre très fine récupérée lors de la combustion du charbon. Il est important de vérifier leur qualité et leur compatibilité avec le ciment qu'on utilise étant donné que des sources différentes produisent des cendres dont les propriétés physiques et chimiques varient grandement. Outre les bienfaits mentionnés dans la section précédente, les cendres volantes permettent aussi de réduire la sédimentation, mais elles vont augmenter le temps de prise;
- les laitiers de hauts fourneaux, des sous-produits de la production de la fonte. Leurs effets sont essentiellement les mêmes que ceux des cendres volantes, mais en moins prononcés;
- la fumée de silice, un sous-produit de la production de différents alliages de silicium. Ce sont des particules de verre sphériques de très faible diamètre, soit d'environ 0,1 à 0,5 microns et d'une finesse Blaine de 1500 à 2000 m²/kg. Utiliser la fumée de silice procure sensiblement les mêmes avantages et les mêmes inconvénients qu'utiliser les cendres volantes ou les laitiers, elle va cependant réagir plus vite avec le ciment, ce qui donne des coulis durcis avec des résistances à la compression à 28 jours beaucoup plus élevées. On peut aussi formuler des mélanges de fumée de silice et de ciment de manière à créer des coulis hautement thixotropiques.

Argile

Certains vont utiliser l'argile, surtout la bentonite, comme produit d'injection soit en suspension dans l'eau ou ajoutée directement aux coulis de ciment. On s'en sert surtout pour produire des coulis stables puisqu'elle réduit la sédimentation des particules de ciment. Par contre, il faut retenir qu'elle va augmenter la viscosité et la cohésion, ce qui réduit la pénétrabilité.

Superplastifiants

L'utilisation de superplastifiants, quant à elle, entraîne une diminution de la viscosité des coulis de ciment et permet l'utilisation de coulis de ciment à plus faible rapport E/C: ces coulis, qui présentent de meilleures caractéristiques physiques et mécaniques, ont donc une fluidité comparable à celle des coulis de ciment de plus haut rapport E/C. Les superplastifiants augmentent également la stabilité des coulis mais aussi leur temps de prise. Il est aussi primordial de vérifier leur compatibilité avec le ciment choisi. [Saleh et Lapointe, 1995 (b)]

4.1.4 Composition des mélanges

Après avoir présélectionné le type de produit à utiliser en fonction des conditions d'application (morphologie et l'état de la fissure, conditions drainantes, de la température etc.), une étude complémentaire doit être réalisée sur la nature de la résine ou du type de ciment et de son rapport E/C à utiliser pour déterminer les limites d'utilisation.

Ces limites sont proposées à partir d'essais en laboratoire à différentes températures et dans des conditions pouvant être modifiées en fonction des conditions in situ. Les essais en laboratoire sont effectués sur les poudres de ciment, sur des coulis frais pour déterminer les propriétés rhéologiques et sur des coulis durcis, pour les propriétés physico-mécaniques, aux tableaux 4.1, 4.2 et 4.3 y sont énumérés les essais ainsi que les normes correspondantes si elles existaient. [Saleh et Lapointe, 1995 (b)]

Tableau 4.1 Essais sur les poudres de ciment (Saleh et Dumont, 1995)

Essais	Normes	Propriétés observées
Analyse chimique au rayon X	aucune	Composition chimique
Sédigraphie	aucune	Granulométrie
Finesse Blaine	ASTM C 204-92	Finesse

Tableau 4.2 Essais sur les coulis frais (Saleh et Dumont, 1995)

Essais	Normes	Propriétés observées
Cône Marsh	aucune	Écoulement
Mini cône d'affaissement	aucune	Étalement
Plaque Lombardi	aucune	Seuil de cisaillement
Essai de ressuage statique	ASTM C 940-89	Ressuage
Essai de temps de prise Vicat	ASTM C 191-82	Temps de prise
Essai de masse volumique	aucune	Masse volumique
Essai au rhéomètre	aucune	Viscosité et seuil de cisaillement

Tableau 4.3 Essais sur les coulis durcis (Saleh et Dumont, 1995)

Essais	Normes	Propriétés observées
Essai de retrait ou expansion	ASTM C 490-93a	Retrait ou expansion
Essai de compression	ASTM C 39-86	Résistance à la compression
Essai de module d'élasticité	ASTM D 3148-86	Module d'élasticité
Essai Pundit	ASTM D 2845-83	Module d'élasticité dynamique et vitesses des ondes

4.2 Équipements

Pour mener à terme une injection de qualité, les équipements jouent un rôle de premier plan. Que l'on injecte des coulis chimiques ou des coulis de base de ciment, il faut que le produit d'injection soit bien mélangé, que l'on soit capable de contrôler la pression et le débit d'injection convenablement et que l'on soit en mesure de surveiller le déroulement des opérations. Cependant, les équipements utilisés pour l'injection des produits diffèrent de ceux pour les coulis de ciment.

4.2.1 Équipements pour l'injection de coulis chimiques

Habituellement, les équipements nécessaires pour ce type d'injection sont moins nombreux et encombrants que ceux des coulis cimentaires, c'est une des raisons pour laquelle, on préfère souvent recourir à l'injection de produits chimiques pour les travaux de moins grandes envergures. Effectivement, on retrouve une large variété d'équipements d'injection. La sélection de cet équipement pour des travaux particuliers est basée sur les critères suivants: type et ouverture de la fissure, pression requise, type de produit injecté et envergure des travaux. [Mailvaganam, 1991] L'équipement comprend entre autres: une pompe, les boyaux,

des valves, les ports, les convecteurs et les différents instruments de lecture. Les pompes disponibles sur le marché varient du simple fusil opéré à la main pour l'injection de petite quantité jusqu'à la pompe pneumatique pour les plus gros travaux.

La plupart des produits chimiques sont formés de deux composantes: la résine et le catalyseur. Pour les petits travaux et pour obtenir un mélange adéquat, il est suggéré d'utiliser une cartouche pour chaque composante et de les relier à un mélangeur statique avant de les injecter. Par contre, dans le cas de travaux de plus grande envergure, il faut recourir à des équipements automatiques qui sont capables de mélanger le produit et de le pomper. De plus avec ces équipements, il est plus simple d'ajuster le débit et la pression au point d'injection.

Le coulis est ensuite amené aux ports des différents points d'injection par l'entremise des boyaux. Ces ports sont des obturateurs de plastiques insérés à l'aide d'un marteau, des obturateurs mécaniques ou des ports de surface. Les boyaux, habituellement en PVC, doivent être capables de supporter la pression et le débit d'injection.

4.2.2 Équipements pour l'injection de coulis de ciment

Le principe de l'injection de coulis de ciment demeure sensiblement le même que celui de l'injection de coulis chimiques, mais les équipements sont différents: ils se doivent d'être plus robustes pour résister à l'abrasion des particules de ciment. De plus, ils sont plus encombrants et ne se retrouvent que dans un format que ce soit pour des travaux de petite, moyenne ou grande envergure. C'est sans doute pourquoi, on utilise rarement cette technique pour des petits travaux d'injection.

D'ailleurs, un circuit typique d'injection, illustré à la figure 4.1, comprend [Houlsby, 1990]:

- un malaxeur;
- un agitateur;
- une pompe;
- des boyaux;
- des valves, des jauges et des obturateurs;
- des instruments de mesure.

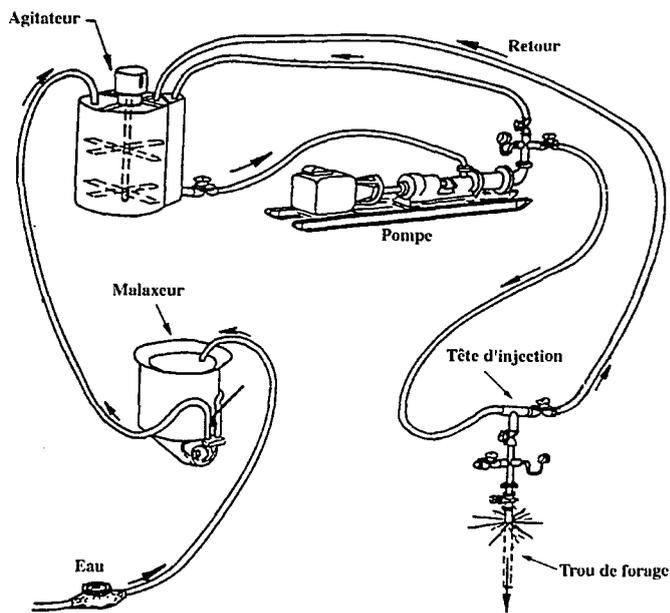


Figure 4.1 Circuit typique pour l'injection de coulis de ciment (Houlsby, 1990)

Malaxeur

Beaucoup considèrent que la clé du succès réside dans la qualité du mélange du coulis, ce qui dépend beaucoup de l'efficacité du malaxeur. [Houlsby, 1990] Les malaxeurs capables de produire des coulis de haute qualité, sont ceux généralement appelés «malaxeurs colloïdaux» ou malaxeurs centrifuges. Ces malaxeurs sont composés d'une pompe centrifuge ou d'un rotor à grande vitesse (> 1500 rpm), d'un réservoir conique et d'une conduite, comme le montre la figure 4.2. La pompe centrifuge ou le rotor à grande vitesse produit un tourbillon d'une violente turbulence, qui crée énormément de cisaillement pour résulter en un mélange rapide et complet des ingrédients du coulis. Ce tourbillon, en plus, d'aider à l'assimilation des divers ingrédients, joue le rôle d'un séparateur centrifuge: en effet, les portions les plus légères, comme l'eau et le coulis moins bien mélangé, se déplacent vers le centre du tourbillon alors que les plus lourdes, vers le côté. C'est ainsi que le coulis moins bien mélangé passe par la pompe ou le rotor et remonte par la conduite pour être réintroduit sur le

côté du réservoir dans la portion où le coulis est mieux mélangé et migre vers le centre sous l'influence de la force centrifuge. Ce processus, illustré à la figure 4.3, se poursuit jusqu'à ce que le coulis soit uniforme et que la force centrifuge ne soit plus capable de séparer le coulis. La pompe ou le rotor sont, par la suite, en mesure de transporter le coulis vers l'agitateur.

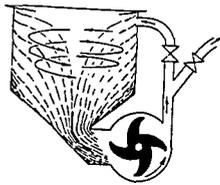


Figure 4.2 Fonctionnement d'un malaxeur colloïdal (Houlsby, 1990)

D'autres types de malaxeurs se retrouvent aussi sur le marché: ils sont souvent moins chers et plus compacts quoique moins efficaces, on les appelle les malaxeurs combinés. Ces malaxeurs ressemblent aux précédents, mais leur pompe et leur rotor créent un tourbillon d'énergie insuffisante pour vraiment produire suffisamment de cisaillement pour séparer les coulis de densité différente et ainsi, créer un mélange de haute qualité. Cependant, certains malaxeurs peuvent produire tout de même des coulis assez uniformes s'ils ont bien été conçus. [Weaver, 1991]

Il existe d'autres types de malaxeurs qui fonctionnent sans pompe ou rotor: les malaxeurs à rouleaux, les malaxeurs à palmes, les malaxeurs à jet ou les malaxeurs à pompe. Ceux-ci vont, cependant, produire des coulis de moins bonne qualité.

La procédure à suivre pour obtenir un mélange uniforme est définie comme suit:

- introduire la quantité requise d'eau, préférablement mesuré à l'aide d'un débitmètre pour plus de précision et de productivité;
- démarrer le malaxeur et attendre qu'il ait atteint sa vitesse maximale;
- ajouter les adjuvants;
- ajouter le ciment;
- ajouter les ajouts minéraux ou les «fillers»;
- mélanger le tout pour une période de temps suffisante pour obtenir un coulis uniforme.

On retire des avantages à utiliser des coulis de haute qualité qui ont bien mélangé:

- les grains de ciment sont séparés les uns des autres et ne forment pas d'amas;

- chaque grain est enveloppé d'une couche d'eau et bien mouillé, ce qui améliore la pénétrabilité et la durabilité;
- le coulis est uniforme;
- le coulis est plus stable.

Agitateur

La principale utilité de l'agitateur est d'emmagasiner le coulis qui vient soit du malaxeur ou du rotor jusqu'à ce qu'il soit injecté. Un bon agitateur va faire en sorte de garder en suspension les particules des coulis instables et de garder liquides les coulis stables thixotropiques. Il consiste habituellement en un récipient cylindrique vertical équipé d'une pale rotative. L'action de la pale seule ne peut pas agiter suffisamment le coulis pour éviter que les particules les plus denses ne se déposent, il faut aussi compter sur l'action des déflecteurs ou même sur certains modèles de pales diagonales à l'axe du récipient afin de créer une turbulence. Il est aussi conseillé de filtrer le coulis avec une grille avant qu'il soit pompé. De plus, le volume de l'agitateur devrait être plus grand que celui du malaxeur pour toujours garder une certaine réserve de coulis. Beaucoup d'utilisateurs préfèrent des agitateurs qui se vident à l'aide d'une pompe. La figure 4.3 montre un agitateur typique. [Weaver, 1991]

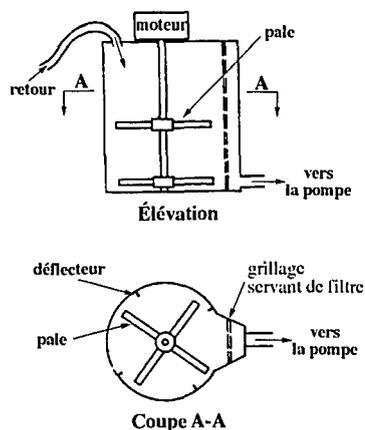


Figure 4.3 Agitateur typique (Houlsby, 1990)

Pompe

L'agitateur fournit le coulis à la pompe qui le fera circuler jusqu'au trou d'injection. Plusieurs types différents de pompes existent, elles comportent toutes, par contre, des avantages et des inconvénients. On peut les diviser en deux catégories: les pompes sans valve et les pompes à valves. [Houlsby, 1990]

Les avantages que l'on retire à utiliser une pompe sans valve, comme la pompe de type rotor hélicoïdal, communément appelée pompe Moyno, sont une alimentation continue avec une faible variation de la pression et de faibles chances de bris ou de blocage [Weaver, 1991]. Par contre, la pression maximale atteinte est plutôt faible, soit d'environ 525 kPa par phase avec des débits allant 4000 l/h et la limite raisonnable est de 4 phases pour 2100 kPa. Cette pompe consiste en un rotor d'acier en rotation à l'intérieur d'un stator. Le déplacement du coulis est induit par le stator à hélice simple dans le stator à doubles hélices dans un mouvement semblable à celui d'une vis. La figure 4.4 illustre une pompe Moyno. [Houlsby, 1990]

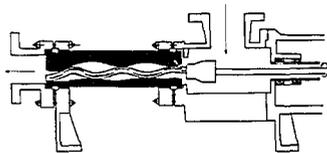


Figure 4.4 Pompe de type Moyno (Houlsby, 1990)

L'utilisation des pompes à pistons est répandue, même si elle comporte certains désavantages. En effet, ces pompes ne peuvent pas vraiment pomper le coulis avec une pression constante et elles sont sujettes aux blocages plus fréquents à cause des valves qui les composent, mais elles sont souvent la seule solution pour injecter à des pressions élevées. Leur fonctionnement est simple et est basé sur l'action d'un piston qui se déplace dans une chambre. Habituellement, ces pompes sont bidirectionnelles: quand le piston se déplace dans une direction, il expulse le coulis d'une chambre et la succion tire le coulis dans l'autre chambre et vice versa quand le piston revient [Houlsby, 1990]. Au total, quatre valves sont nécessaires pour que la pompe fonctionne adéquatement. Il existe aussi des pompes à cylindre simple à deux phases, qui se déplace de gauche à droite et où l'on voit le coulis entré dans la chambre de gauche par la valve inférieure et il est expulsé de la chambre droite par la valve supérieure (figure 4.5). Les nouvelles pompes plus compactes vont comprendre deux cylindres avec les pistons aux extrémités d'un arbre actionné au centre. La capacité de ces pompes est très variable allant de faible à très grande [Houlsby, 1990].

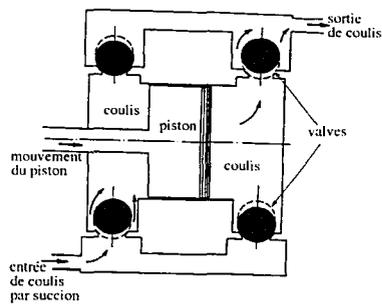


Figure 4.5 Fonctionnement d'une pompe à piston (Houlsby, 1990)

Pompe à béliet

Le fonctionnement de cette pompe (figure 4.6), ressemble à celui des pompes à piston. sauf que le coulis est déplacé par le changement de volume que cause le mouvement du béliet. Encore une fois, des valves sont nécessaires pour la succion et pour l'expulsion du coulis. Ces pompes sont, pour leur part, capables de produire des pressions élevées quoique instables. [Houlsby, 1990]

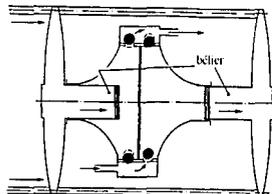


Figure 4.6 Fonctionnement d'une pompe à béliet (Houlsby, 1990)

Pompe à diaphragme

La pompe à diaphragme est capable de produire des pressions instables assez substantielles (jusqu'à 5600 kPa) avec un débit plutôt faible. On doit s'assurer d'être en mesure de changer rapidement le diaphragme qui peut s'user, éclater ou se déchirer. À la figure 4.7, on voit un diaphragme au repos: les valves sont fermées. Lorsqu'il se déplace vers la droite, il

force le coulis à s'évacuer par la valve du haut et en revenant à sa position initiale, il crée une succion qui aspire le coulis dans la chambre.

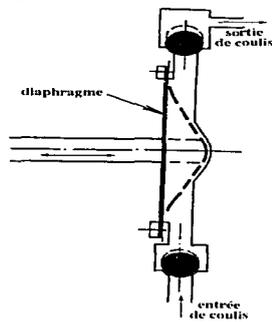


Figure 4.7 Fonctionnement d'une pompe à diaphragme (Houlsby, 1990)

Quelque soit le type de pompe, il est suggéré d'utiliser un système d'injection comprenant un retour à l'agitateur ou au malaxeur, ce qui rend plus facile de gérer le débit quand approche le refus [Weaver, 1991] et [Houlsby, 1990]. Par contre, à savoir si l'on doit injecter à une pression stable ou cyclique, deux théories s'opposent: certains prônent l'injection à des pressions stables puisqu'ils disent que le coulis s'écoule uniformément, que cela minimise la sédimentation du ciment dans les fissures et que cela retarde les effets de la thixotropie; d'autres, cependant, prétendent qu'une pression cyclique est bénéfique pour la pénétration parce qu'elle permet de séparer les amas de particules.

Quoi qu'il en soit, ces variations de pressions peuvent être atténuées en utilisant des boyaux flexibles et des chambres à «surge» sur le réseau. Il est aussi préférable, d'avoir une pompe supplémentaire prête à opérer en quelques instants, ceci peut même permettre de sauver un trou d'injection.

4.2.3 Instrumentation

L'instrumentation et l'automatisation d'un site jouent un rôle de premier plan quant au succès du programme d'injection. Quand ils sont reliés à un système d'acquisition de données, ils deviennent particulièrement utiles pour:

- contrôler la recette des gâchées de coulis;
- opérer le malaxeur;
- contrôler la pompe;

- suivre les paramètres d'injection (débit, pression, E/C)
- contrôler à distance les valves de contrôle;
- analyser en temps réel les paramètres d'injection;
- réagir et avertir en cas d'anomalies;
- fournir des données complètes et fiables pour la documentation et l'évaluation postmortem.

La figure 4.8 montre un réseau d'injection complet où le système d'acquisition des données lit les différents capteurs de pression, de débit, de densité ou de déplacement pour ensuite opérer les divers équipements d'injection. Il existe plusieurs marques et gammes de capteurs, systèmes d'acquisition de données ou équipements automatisés sur le marché. Il importe alors d'analyser les besoins pour éviter de créer des réseaux trop complexes, l'injection demeurant en elle-même un procédé assez simple, pour permettre de choisir des équipements adéquats à des coûts abordables.

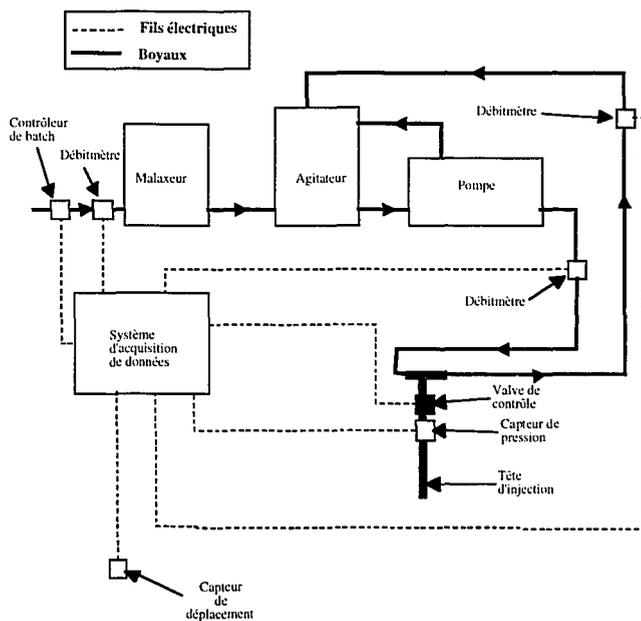


Figure 4.8 Réseau du système d'acquisition de donnée (Houlsby, 1990)

Bien que pour certains, cela puisse paraître complexe et coûteux, implanter un tel réseau comporte de nombreux avantages au point de vue technique et économique. Il permet entre autres de [Houlsby, 1990]:

- réduire le temps d'injection;
- traiter adéquatement et plus rapidement les situations difficiles;
- réduire le nombre d'inspecteurs;
- évaluer adéquatement les techniques d'injection utilisées.

4.3 Méthodes

4.3.1 Injection de sol ou de roc

Lors des injections de milieux rocheux ou granulaires, il est de pratique commune quand on injecte des trous d'une profondeur supérieure à 10 m de les diviser en sections d'environ 5 m. En procédant de la sorte, il devient plus facile de contrôler la pression dans le trou de forage, les sections supérieures, généralement plus faibles, sont soumises à des pressions moins élevées, la ségrégation des particules de ciment est moindre tandis que l'eau de ressuage s'évacue plus facilement. Il existe six procédures qui comportent des avantages et des inconvénients selon les conditions où elles sont utilisées.

Descendante sans obturateur

La procédure descendante sans obturateur, comme son nom l'indique, consiste à forer un trou sur une longueur de section donnée, à le laver, à effectuer un essai d'eau préliminaire, à l'injecter. Par la suite avant la prise finale du coulis, le trou est lavé. On est ensuite prêt à recommencer la même procédure pour l'injection des sections subséquentes. Il est important de noter qu'aucun obturateur n'est utilisé dans le trou de forage, si ce n'est celui qui demeure toujours à la surface lorsque l'utilisation d'une tête d'injection conventionnelle n'est pas possible et qu'il est habituellement préférable d'attendre 24 h entre chaque injection. La figure 4.9 aide à mieux comprendre la procédure. [Houlsby, 1990]

Descendante avec obturateur

Cette procédure est pratiquement la même que la précédente, sauf qu'un obturateur est utilisé pour isoler les sections supérieures et ainsi, éviter qu'elles soient injectées. On suggère toujours par contre, d'attendre 24 h avant de procéder à l'injection suivante. La figure 4.10 montre les différences existant entre ces deux procédures. [Weaver, 1991]

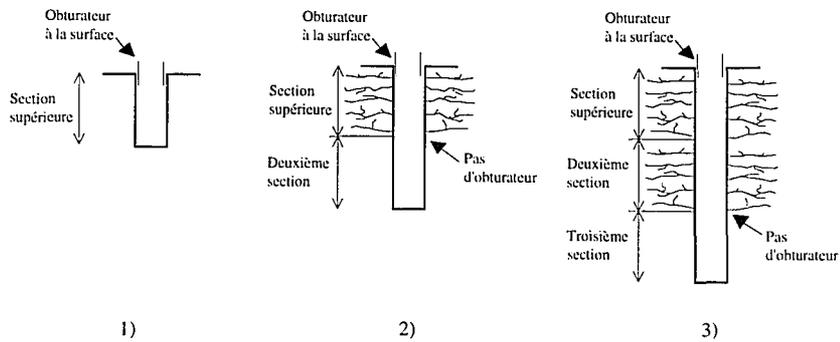


Figure 4.9 Injection descendante sans obturbateur

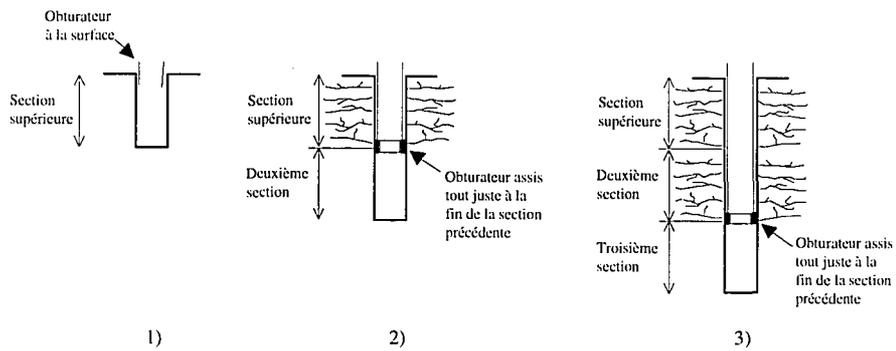


Figure 4.10 Injection descendante avec obturbateur

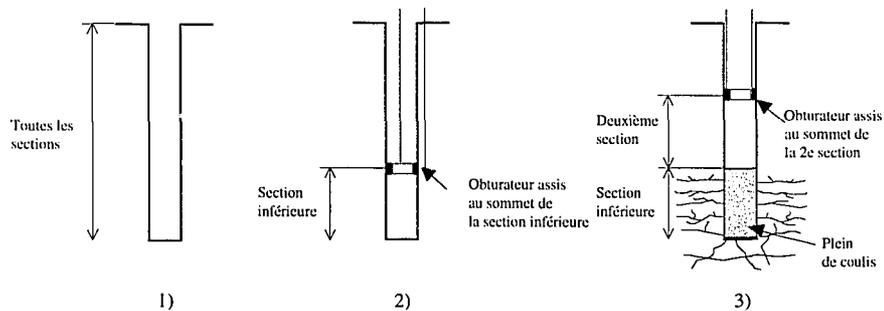


Figure 4.11 Injection ascendante

Ascendante

La procédure ascendante exige que l'on fore le trou au complet et que l'on l'injecte en remontant après l'avoir lavé et testé. Cette procédure exige évidemment l'utilisation d'un ou de deux obturateurs pour isoler les sections supérieures. Cependant, il n'existe pas un consensus à savoir quand faut-il injecter la section subséquente. Certains suggèrent de remonter l'obturateur aussitôt que la pression s'est dissipée dans la section précédente et d'immédiatement injecter la section suivante. D'autres pensent qu'il est préférable d'attendre au moins 6 h avant l'injection de la section suivante. La figure 4.11 illustre les différentes étapes à suivre si cette procédure est privilégiée. [Houlsby, 1990]

En circuit

Les procédures de l'injection en circuit en descendant ou en remontant sont pratiquement les mêmes que celles décrites précédemment, sauf que, pour remplacer l'obturateur ou la tête d'injection, on place un tuyau directement au fond du trou de forage. La figure 4.12 rappelle les étapes à suivre pour injecter selon cette procédure particulière. [Houlsby, 1990]

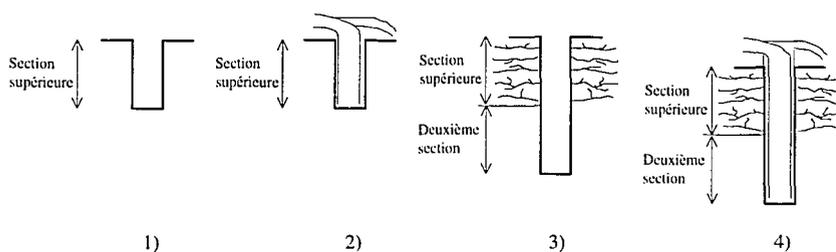


Figure 4.12 Injection en circuit (Houlsby, 1990)

«MPSP»

Cette procédure du «Multiple Packer Sleeve Pipe» est la méthode la plus récente en ce qui concerne l'injection des milieux rocheux ou des sols, où les parois des trous de forage peuvent s'affaisser. Elle consiste à forer en entier le trou destiné à l'injection, le nettoyer et par la suite y insérer complètement au fond, le tube externe. L'étape suivante consiste à insérer le tube à obturateurs multiples, fait de sacs de polypropylène qui vont, une fois gonflés, délimiter la longueur de chaque section.

Lorsque tous les sacs sont gonflés, on peut procéder au test d'eau préliminaire et à l'injection comme telle. Durant cette injection, on utilise le même tube où des obturateurs normaux isolent la section à injecter en prenant soin de le placer de sorte que ses trous soient entre les obturateurs du tube. Même si on peut procéder soit en montant ou en descendant, c'est plutôt la procédure ascendante qui est plus courante. Une fois, toutes les sections injectées, il faut injecter un coulis très épais pour sceller le trou dans lequel en permanence le tube à obturateurs multiples. La figure 4.13 montre un trou où l'on a inséré un tube pour injecter à l'aide de cette procédure. [Houlsby, 1990]

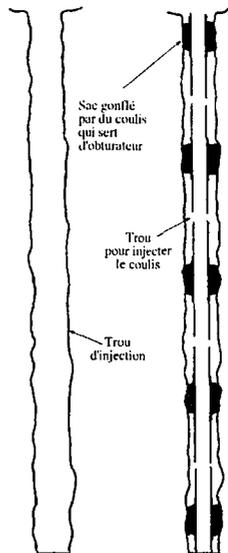


Figure 4.13 Injection selon le «MPSP»

Comparaisons des diverses procédures

Les diverses méthodes décrites dans les sections précédentes ne s'appliquent pas nécessairement à toutes les situations ou milieux. Par exemple, la procédure du «MPSP» ou de l'injection en circuit sont plus adaptées à des injections de sol ou de roc de faible qualité. Cependant, des auteurs comme Houlsby trouvent que l'injection en circuit est très dispendieuse, qu'elle est sujette à de nombreux blocages, qu'elle est difficile à réaliser et que la qualité de l'injection laisse à désirer. Il prétend même qu'elle est appelée à disparaître avec

Tableau 4.4 Avantages des diverses procédures
(Adapté de Houlby, 1990 et de Bruce et Gallavresi, 1988)

Paramètres	Descendante sans obturateur	Descendante avec obturateur	Ascendante
Coûts	<ul style="list-style-type: none"> - Moins cher en cas de fuites, de connexions ou de déplacements - Coûts totaux s'apparentent à ceux de la procédure ascendante 		<ul style="list-style-type: none"> - Forage le moins cher - Moins de perte de coulis - Procédure la moins chère si tout va bien
Temps	<ul style="list-style-type: none"> - Plus rapide dans les situations problématiques 		<ul style="list-style-type: none"> - Procédure la plus rapide si tout va bien - Délais entre les injections plus courts (6 h seulement)
Qualité	<ul style="list-style-type: none"> - Meilleure qualité - Évacuation du ressuage - Contrôle de l'injection à la surface - Moins de chance de blocage - Plus facile de détecter les imperfections de l'injection de la section précédente - Possibilité d'utiliser des pressions plus élevées étant donné que les sections supérieures servent de toit - Possibilité d'ajuster la profondeur de forage et la longueur des sections 	<ul style="list-style-type: none"> - Grâce aux obturateurs les autres sections ne sont pas soumises à des pressions trop élevées - Qualité d'injection inférieure à la procédure sans obturateur, mais supérieure à la procédure ascendante - Possibilité d'utiliser des pressions plus élevées étant donné que les sections supérieures servent de toit - Possibilité d'ajuster la profondeur de forage et la longueur des sections - Possibilité de traiter des zones particulières 	<ul style="list-style-type: none"> - Plus facile à programmer et à contrôler le déroulement de l'injection - Possibilité de traiter des zones particulières

Tableau 4.5 Inconvénients des diverses procédures
(Adapté de Houlby, 1990 et de Bruce et Gallavresi, 1988)

Paramètres	Descendante sans obturateur	Descendante avec obturateur	Ascendante
Coûts	- Temps de forage allongé à cause des nombreux déplacements et répétitions	- Temps de forage allongé à cause des nombreux déplacements et répétitions - Coûts élevés pour placer et réparer les obturateurs - Sûrement la procédure la plus chère	
Temps	- Délai de 24 h entre les injections	- Toujours la procédure la plus longue à cause de la difficulté à manoeuvrer et du poids des obturateurs - Délai de 24 h entre les injections	
Qualité	- Parfois difficile de sceller les fuites à la surface	- Difficile de détecter les anomalies - Sujets à des blocages fréquents - Possibilité de perdre le trou si l'obturateur reste bloqué - Pratiquement impossible d'appliquer la pression de refus - Difficile d'évacuer l'eau de ressuage - Inutilisable si le trou n'est pas assez lisse pour asseoir adéquatement les obturateurs	- Injection de qualité inférieure - Possibilité de fuite à la surface - Sujets à des blocages fréquents - Possibilité de perdre le trou si l'obturateur reste bloqué - Pratiquement impossible d'appliquer la pression de refus - Pression peut être dommageable - Injection sous la nappe phréatique devient problématique

l'avènement du «MPSP».[Houlsby, 1990] Pourtant Weaver affirme de son côté que les Espagnols l'utilisent fréquemment parce qu'ils prétendent qu'elle permet d'éviter d'injecter à des pressions erronées et de maintenir le coulis en circulation malgré de très faible débit. [Weaver, 1991]

La «MPSP», selon Houlsby, est une procédure difficilement adaptable au milieu rocheux puisque la circulation du coulis est restreinte par le tube portant les sacs et par les parois rocheuses qui rendent difficiles l'ouverture de la manchette. [Houlsby, 1990]

L'injection en circuit et le «MPSP» sont suivies moins fréquemment que l'injection en sections descendantes ou ascendantes. Celles-ci sont surtout utilisées dans des conditions normales et sont souvent moins coûteuses et plus faciles à appliquer. Pour les comparer adéquatement, il faut analyser la qualité de l'injection résultant, leur coût et le temps qu'elles requièrent. Les tableaux 4.4 et 4.5 montrent les avantages et les inconvénients de chaque procédure.

Sur certains sites, il peut arriver que l'on doive utiliser plus qu'une procédure., ce qui permet de tirer le maximum de chacune d'elles.

4.3.2 Injection du béton

L'injection des fissures du béton, quoiqu'elle s'apparente à l'injection du roc, exige une procédure différente. Habituellement, la structure à réparer a été préalablement inspectée et la ou les fissures à réparer ont été repérées précisément. De sorte au lieu de simplement injecter selon une des procédures tout juste expliquées dans la section précédente, on peut injecter à la surface si la fissure à traiter est superficielle, alors qu'il est préférable d'utiliser deux obturateurs pour isoler une fissure plus profonde et procéder selon la méthode classique, la méthode classique modifiée ou la méthode du Grouting Index Number (G.I.N.). En procédant de la sorte, on s'assure d'injecter une seule fissure à la fois pour être en mesure de mieux contrôler les différents paramètres afin de bien injecter la fissure avec le moins de risque possible.

Injection de surface

L'injection de surface est une méthode d'injection qui sert exclusivement à réparer les fissures mortes d'une structure de béton. La première étape consiste à installer les ports. On doit forer des trous le long de la fissure, dont l'espacement et la profondeur dépendent du membre réparé. Règle générale, ils sont séparés de 75 à 250 mm et profonds d'au moins

12,5 à 37,5 mm. Le forage est préférablement exécuté avec une perceuse munie d'un aspirateur ou d'un adaptateur qui évacue la poussière au fur et à mesure qu'elle se forme. On peut aussi utiliser des ports de surface pour éviter de forer des trous quand on doit injecter une fissure ouverte et facile d'accès. Ces ports sont collés à la surface de la fissure avec une couche épaisse d'époxy. Il faut ensuite nettoyer adéquatement la fissure et la débarrasser de tous les débris.

Par la suite, à la seconde étape, on doit sceller la surface de la fissure ainsi que les ports d'injection, qui ont préalablement été insérés à environ 12,5 mm de profondeur. On peut soit utiliser un mortier d'époxy ou un mortier de ciment à prise rapide pour cette opération. Dans des conditions humides, il est préférable d'utiliser le mortier de ciment, qui doit, une fois durci et mûri correctement, être enduit d'une couche d'époxy pour le renforcer. Quand le tout est bien scellé, on relie tous les ports pour procéder à un essai d'injectabilité.

On est maintenant prêt à injecter la fissure. Ainsi, après avoir monté et vérifié l'équipement, on prépare le matériel pour le malaxage. Cette opération se doit d'être continue et adaptée au débit d'absorption.

De cette manière, après avoir adéquatement pesé et mélangé toutes les composantes du produit si une pompe automatique n'est pas utilisée, on peut injecter le produit à partir des différents ports d'injection. Pour des injections de fissures verticales ou inclinées, on commence par le bas remontant, alors que les ports d'injection horizontales sont injectées en série à partir d'une de leurs extrémités. Avant de changer de ports, on doit attendre que le produit coule du port suivant; on cesse l'injection et on scelle le port avant de poursuivre l'injection au port suivant. On procède de cette façon jusqu'à ce que tous les ports aient été injectés. [Mailvaganam, 1991]

Injection classique

En général, la plupart des injections sont réalisées par la méthode d'injection classique, une méthode utilisée fréquemment à travers le monde depuis des décennies. Elle consiste à injecter un coulis instable (E/C vol. \approx 5 à 10) à stable dont le rapport E/C diminuera au fur et à mesure que l'injection avance selon l'absorption à une pression constante jusqu'au refus d'absorption. Par exemple, la méthode d'injection classique a été employée pour réparer les fissures plongeantes du barrage Daniel-Johnson et les principales étapes de la procédure à suivre pour ces injections sont:

- l'injection doit commencer aux trous montrant les plus grandes fuites d'eau à une pression plus élevée que la tête d'eau et avec un rapport eau/ciment volumique de 5. La pression peut être augmentée graduellement si requis, mais ne doit pas excéder les limites prescrites (2400 kPa ou 350 psi). Au début de l'injection tous les trous d'injection sont laissés ouverts, et sont fermés au fur et à mesure que le coulis communique avec ces trous. Par conséquent, la surface à injecter pourrait être égale à toute la surface de la fissure plongeante:
- le coulis d'injection peut être épaissi graduellement jusqu'à un rapport E/C volumique de 0,75 (5; 3; 2; 1,33; 1; 0,75);
- la pression d'injection augmente graduellement au fur et à mesure que le rapport E/C est abaissé. Successivement, le point d'injection est déplacé d'un trou à l'autre après l'atteinte de la pression de refus (2400 kPa ou 350 psi).

Puisque le premier mélange n'est pas stable, l'injection commence par décantation du ciment dans la fissure. La décantation se fait là où la vitesse d'écoulement est la plus faible. En fait, dès que le coulis rentre dans la fissure, une grande partie se dirige dans la direction amont vers le réservoir où il rencontre le moins de résistance. C'est dans cette direction que la fissure est la plus ouverte et la vitesse est la plus grande et, par conséquent, il n'y a pas de décantation. Il n'y a donc pas de colmatage dans cette direction; ceci est très important car ce principe permet de maintenir constamment le réservoir en communication directe avec le forage d'injection (fissure ouverte) et d'empêcher le développement d'importantes pressions. Cependant tout le coulis ne se propage pas vers l'amont. Une faible quantité pénètre dans les autres directions, où la vitesse est d'autant plus faible que les pertes de charge sont plus grandes. C'est pourquoi la décantation se fait dans la partie aval de la fissure, qui est colmatée en premier lieu (Figure 4.14).

Les dimensions de la zone injectée par un même trou de forage dépendent de plusieurs facteurs, en particulier, des dimensions de la fissure, de son orientation, de son pendage, de l'emplacement du trou d'injection, de la viscosité du coulis et de la pression d'injection. En conclusion, il faut retenir les points suivants dans le processus de l'injection des fissures plongeantes par la méthode classique:

- un coulis instable E/C vol. = 5 (E/C mass. = 3,75) est utilisé;
- le colmatage de la fissure se faisait en aval, progressait vers l'amont (Figure 4.14) et était limité de chaque côté par différents facteurs tels que: débit d'injection, pression, viscosité, caractéristiques de la fissure, etc.:

- un faible pourcentage de coulis était réellement retenu, pourcentage probablement inférieur à 5% (dépendant de la géométrie de la fissure);
- pendant toute la durée de l'injection, un cheminement direct était maintenu vers le réservoir et c'est toujours celui à la plus faible perte de charge;
- la surface d'injection peut englober toute la surface de la fissure plongeante.

Pour compléter l'injection il faut alors fermer le chemin direct entre le trou et le réservoir (fissure fermée). Ce dernier stade de l'injection est délicat et parfois long à réaliser. Théoriquement, c'est le seul stade où le forage ne communique plus avec le réservoir et où la pression dans la fissure augmente assez rapidement pour atteindre la pression de refus.

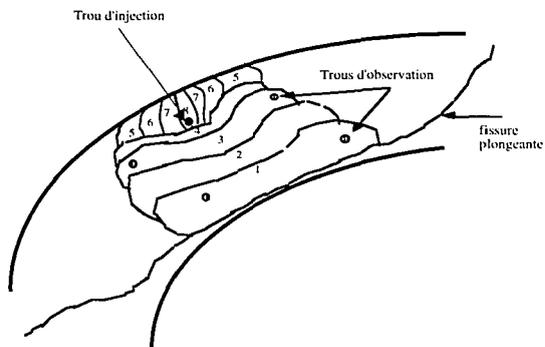


Figure 4.14 Phases successives de colmatage lors de l'injection par la méthode classique d'une fissure plongeante (Saleh et Lapointe, 1996)

Injection classique modifiée

Suite aux diverses études entreprises (section 5.1) sur les méthodes et les produits d'injection, l'Équipe Béton de l'IREQ de l'Hydro-Québec a développé la méthode classique modifiée. Les procédures diffèrent de celles de la méthode classique, expliqué ci-haut, par certains points dont:

- l'utilisation d'un coulis stable avec des rapports E/C vol. = 1 (E/C mass. \approx 0,75) et moins est prescrite;
- étant donné que le rapport E/C est faible, il faut ajouter du superplastifiant (1 %) pour obtenir un coulis plus maniable;

- l'utilisation d'un coulis à base de ciment microfin est préférable, si la fissure est très fine ($< 0,5$ mm);
- la surface d'injection est limitée à un plot, donc les trous sur les autres plots restent constamment ouverts. Dans tous les cas, une vérification par modélisation numérique doit être réalisée pour s'assurer que les paramètres choisis sont acceptables;
- le débit et de la pression sont contrôlés en temps réel par un système d'acquisition de données et l'ouverture des valves de contrôle est automatique pour éviter de dépasser la pression maximale admise;
- il y a une restriction sur l'utilisation des équipements, comme l'utilisation d'un malaxeur centrifuge colloïdal est conseillée pour obtenir des coulis de bonne qualité.

Cette méthode d'injection se différencie surtout par l'utilisation d'un coulis stable tout au long de l'injection. Ceci comporte de nombreux avantages. Pour qu'un coulis soit considéré stable, il faut qu'il montre moins de 5% de ressuage après 2 h. Les principaux avantages des coulis stables sont:

- des meilleures caractéristiques physiques et mécaniques;
- une meilleure injection des fissures à cause d'un ressuage moins important;
- une meilleure adhérence;
- un retrait moins important lors de la prise;
- une durabilité et une résistance au lessivage du coulis accrues;
- un risque de fracturation hydraulique moins élevé lors de l'injection;
- un temps d'injection diminué à cause d'une cohésion accrue.

Par contre avant d'entreprendre une injection, il est primordial de déterminer la recette optimale du produit utilisé et de vérifier sa compatibilité avec les adjuvants, qui peuvent être ajoutés au coulis.

Grouting Index Number (G.I.N.)

La méthode d'injection du Grouting Index Number (G.I.N.) a été développée par Lombardi [Lombardi et Deere, 1993] dans le but de contrôler l'énergie appliquée à la fissure durant une injection. Les principales caractéristiques de ce type d'injection sont:

- une recette unique de coulis stable avec un rapport E/C constant tout au long de l'injection et contenant du superplastifiant pour améliorer sa pénétrabilité;
- un débit de faible à moyen et plutôt constant, qui résultera en une augmentation de la pression au fur et à mesure que le coulis pénètre la fissure;
- un contrôle en temps réel de la pression, du débit et du volume injecté à l'aide d'un système d'acquisition de données;
- les pressions d'injection sont normalement plus élevée que celles de la méthode classique;
- l'injection se termine quand la courbe de la pression en fonction du volume total injecté atteint la courbe hyperbolique de contrôle (G.I.N. curve), la valeur limite de pression ou la valeur limite de volume.

Cette méthode est valable pour l'injection des fissures fermées (fissures n'ayant aucune communication avec le milieu externe). En supposant certaines hypothèses, le G.I.N. peut être utilisé pour colmater de fissures ouvertes (fissures en communication permanente avec le milieu externe). Les avantages de cette technique résident dans la constance de la portée du coulis et dans l'économie encourue. Ils sont obtenus en réduisant le trajet parcouru par le coulis et le volume injecté grâce à des moyens comme l'utilisation d'un coulis d'une pénétrabilité moindre ainsi que le respect de limites sur le volume total à injecter et les pressions d'injection.

Cependant, beaucoup de fissures larges comportent une portion de fissures fines et quand cette méthode est utilisée, il est habituellement préférable d'injecter les fissures larges en premier lieu et par la suite, injecter un coulis moins visqueux et moins cohésif avec des pressions plus élevées seulement si le volume de coulis injecté reste faible. Des pressions plus élevées sont acceptables puisque, à mesure que le coulis pénètre des fissures fines, elles vont diminuer rapidement.

Équations pour calculer le G.I.N.

Force maximale applicable:

Pour obtenir la force pour résister aux sous-pressions (F_{\max}), il faut d'abord calculer le poids du milieu au-dessus de la fissure. Pour ce faire, on suppose que le poids à calculer est le poids de la projection verticale de la fissure.

$$F_{\max} = W \quad (4.1)$$

où

F = force (N)

W = poids propre du barrage ou du terrain au-dessus de la région à injecter (N)

Pression d'injection maximale:

$$P_{\max} = \sqrt[3]{\frac{F_{\max} \times 3c^2}{\pi t^2}} \quad (4.2)$$

où

P_{\max} = pression (Pa)

c = cohésion du coulis (N/m²)

t = moitié de l'ouverture de la fissure (m)

Volume maximal de coulis:

À l'aide du rayon maximal de pénétration (R_{\max})

$$R_{\max} = \frac{P_{\max} \times t}{c} \quad (4.3)$$

on peut calculer le volume maximal à injecter (V_{\max})

$$V_{\max} = \pi R_{\max}^2 \cdot 2t = \frac{2\pi P_{\max}^2 t^3}{c^2} \quad (4.4)$$

où

R_{\max} = distance (m)

V_{\max} = volume (m³)

Grout Intensity Number (G.I.N.):

Pression d'injection (Bars) x Volume de coulis injecté (lit) = G.I.N.

$$P_{\max} (\text{bar}) \times V_{\max} (\text{lit}) = G.I.N. \quad (4.5)$$

où

1 bar = 100 kPa

Courbe du G.I.N.

Par la suite, la courbe est tracée en utilisant le volume en abscisse et la pression en ordonnée. Pour tracer la courbe, il suffit de garder la valeur du G.I.N. constante et de la diviser par différentes valeurs de volume.

$$P = \frac{G.I.N.}{V} \quad (4.6)$$

Par ailleurs, lorsqu'une fissure ouverte commence à se colmater au niveau de l'ouverture ou lorsque l'on injecte une fissure fermée, la pression se bâtit assez rapidement. Il est donc nécessaire de définir une limite supérieure de pression d'injection (P_{max}) pour éviter tout risque de fracturation hydraulique causée par des pressions élevées.

La courbe du G.I.N. peut être tracée en fonction de la pression effective à l'obturateur. Mais on peut aussi calculer une courbe pour la pression au manomètre, ce qui rend la tâche plus facile.

Différents cas possibles du G.I.N.

Lorsque cette technique est utilisée différentes situations peuvent survenir. Ces différents cas sont expliqués et illustrés à l'aide de la figure 4.15. [Turcotte et al., 1994]

Cas 1

L'absorption est relativement élevée et la pression ne peut pas dépasser une certaine valeur. L'injection sera donc arrêtée quand le volume de coulis injecté atteindra le volume maximal admis. On assiste à ce genre de comportement généralement durant l'injection de fissures ouvertes.

Cas 2

Quand on atteint la courbe G.I.N. suite à une augmentation régulière de la pression et du volume d'absorption, le pompage est donc arrêté pour respecter la courbe. Les injections de fissures moyennes se comportent habituellement comme le fait cette courbe.

Cas 3

Quand l'absorption est faible, le pompage sera arrêté si la pression dépasse la pression maximale admise. À certaines occasions, il peut arriver que ce soit la capacité de la pompe qui

dicte cette pression, i. e. la capacité de la pompe est moins élevée que la pression maximale.
Une courbe de cette apparence reflète sûrement l'injection d'une fissure très fine.

Cas 4

Habituellement, cette situation ne se produit pas si la courbe est respectée. Cependant, on remarque, malgré des pressions très faibles, que des sous-pressions puissent survenir. En effet, un volume suffisant de coulis est capable de produire ces sous-pressions, que l'on doit éviter.

Par contre dans le cas où le coulis est injecté dans une fissure ouverte, il est pratiquement impossible de prédire le volume à injecter qui restera dans la fissure puisque la fissure est en contact direct avec le réservoir et qu'une grande partie du coulis y est déversée. Dans certains cas, plus de 95 % du coulis est directement déversé du côté amont du barrage.

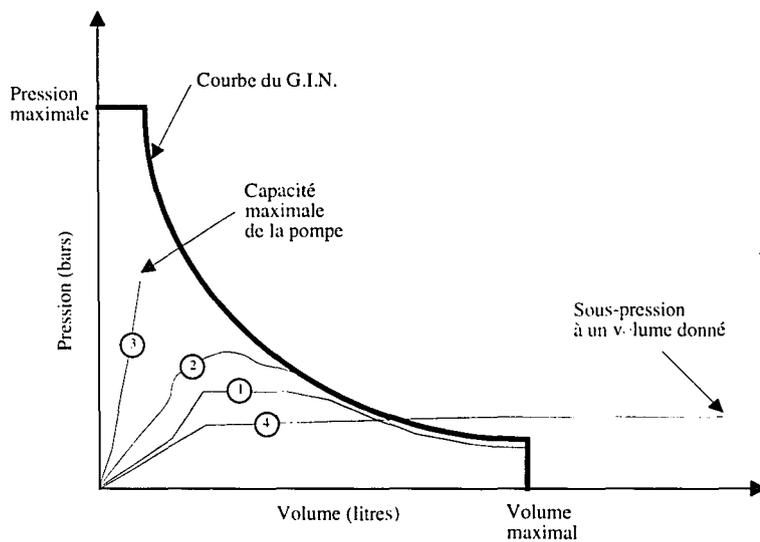


Figure 4.15 Différents cas possibles durant une injection de type G.I.N.
(Adaptée de Turcotte et al., 1994)

4.4 Paramètres d'injection

Plusieurs paramètres doivent être considérés durant la conception et le déroulement d'une injection. De ceux-ci, les plus importants sont la pression maximale, la pression de refus et le débit.

4.4.1 Pression maximale

La pression maximale d'injection est un paramètre critique. Cette pression maximale est la pression qu'il ne faut en aucun cas dépasser sans courir le risque de causer des désordres importants au milieu traité ou aux structures et milieux environnants. En effet, cette pression d'injection, si elle agit sur une surface suffisante, est capable d'engendrer des forces pouvant provoquer la fracturation hydraulique du milieu traité ou des déplacements potentiellement dommageables.

Plusieurs facteurs peuvent avoir une influence sur les réactions et les effets qu'engendrent la pression sur le milieu ou la structure de béton. Tout d'abord, il est clair que tous les milieux injectés ne réagissent pas tous de la même manière. En effet, les milieux granulaires sont des sols qui ne peuvent pas se rompre, cependant l'action de la pression peut occasionner des déplacements (hydrojacking) ou des désordres (quick clays), qui vont affecter les structures environnantes.

Pour leur part, les milieux rocheux et les structures de béton, souvent associés à un roc homogène de bonne qualité, doivent d'être traités avec prudence. De plus, en aucun temps, il ne faut utiliser une forte pression dès le début de l'injection, il est plutôt préférable d'injecter à une faible pression pour commencer et vérifier si des fuites ou des déplacements surviennent et par la suite, augmenter graduellement la pression. [Houlsby, 1990] Ces milieux peuvent aussi être affectés par les forces excessives créées par la pression d'injection. Si le roc est déjà fissuré, des déplacements peuvent se produire et s'il ne l'est pas, qu'il soit de faible ou de bonne qualité, la force induite durant l'injection peut le fissurer. Cependant, la profondeur à laquelle se déroule l'injection, peut si elle est suffisante atténuer les effets de la pression d'injection. En effet, plus on injecte profondément une fissure ou un sol, plus on bénéficie de l'action du poids propre et de l'effet de confinement du milieu environnant. Ainsi, pour causer des dommages, la force doit contrecarrer d'abord les effets du poids de la couche supérieure et ceux du confinement causés par la masse environnante pour soulever ou fissurer un massif de roc. Houlsby va même jusqu'à comparer ces effets à ceux de la pression hydrostatique. [Houlsby, 1990] Parfois, d'autres forces résultant de l'action d'ancrages, de charges diverses (eau du réservoir) ou la répartition des charges par la structure vont atténuer les effets néfastes

de la pression d'injection. L'orientation des fissures, les caractéristiques rhéologiques du coulis, les caractéristiques du milieu (perméabilité ou ouverture), la géologie et les conditions hydrologiques ont aussi une influence sur l'action de la pression. [Weaver, 1991]

C'est d'ailleurs pourquoi, il est très important de bien connaître le comportement de chaque milieu à injecter. Des essais d'eau exploratoires, des essais avec coulis allant même jusqu'à la fracturation hydraulique dans certains cas, des études structurales et l'expérience sont souvent requis pour déterminer la pression maximale. Avec les années et la pratique, plusieurs lignes directrices ont été soumises pour aider à estimer les pressions maximales. La plupart d'entre elles traitent de situations normales, même si dans plusieurs cas des pressions supérieures peuvent être utilisées sans causer de dommages. Les plus connues de ces règles sont les «rules of thumb» américaine et européenne développées à partir du système d'unités qui les définit: la règle américaine (1 psi/pied de profondeur ou 23 kPa/mètre de profondeur) est beaucoup plus conservatrice que la règle européenne (100 kPa/mètre de profondeur). Les divergences de philosophie entre les deux écoles de pensée sont d'ailleurs reflétées par ces règles. En effet, beaucoup d'Européens préconisent des pressions d'injection élevées qui permettent même d'agrandir la fissure pour faciliter la pénétration du coulis et l'évacuation de l'eau de ressuage. Ils prétendent qu'une fois que l'application de la pression est arrêtée, la fissure se referme et que la fissure est soumise à une sorte de précontrainte, ce qui devrait expulser une partie de l'eau de ressuage et compacter le coulis pour une injection de meilleure qualité. Les tenants américains, pour leur part, préfèrent injecter à des pressions modérées pour ainsi éviter de causer des désordres ou des déplacements.

Ces deux philosophies comportent naturellement des avantages et des inconvénients, il suffit de les utiliser dans les conditions qui s'y prêtent le mieux pour ainsi, obtenir les meilleurs résultats possibles. Cependant pour l'injection des structures de béton, il est fortement recommandé de procéder à des études structurales avant d'entreprendre les travaux. Ceux-ci serviront entre autres à vérifier si les travaux seront sécuritaires.

4.4.2 Pression de refus

La pression de refus, quant à elle, est la limite qui détermine le moment d'arrêter l'injection. Ce critère est, selon Weaver et Bussey, très important pour le succès de l'injection. Il faut continuer à pomper tant et aussi longtemps que dure l'absorption de coulis. Certains suggèrent aussi de continuer à appliquer de la pression pour une certaine période de temps, après que l'absorption soit devenue nulle. Le tableau 4.6 montre les diverses définitions de certains auteurs. De plus, en tout temps, l'étude des paramètres et des facteurs qui influencent

l'injection de chaque site est aussi nécessaire pour un choix éclairé du critère de refus.
[Weaver, 1991]

Tableau 4.6 Pression de refus
(Adapté de Houlby, 1990 et Weaver, 1991)

Auteurs	Pression	Absorption	Durée
USBR	< 50 psi (345 kPa) 50 psi (345 kPa) à 100 psi (690 kPa) 100 psi (690 kPa) à 200 psi (1380 kPa) > 200 psi (1380 kPa)	1 pi ³ (28.3 l) / 20 min 1 pi ³ (28.3 l) / 15 min 1 pi ³ (28.3 l) / 10 min 1 pi ³ (28.3 l) / 5 min	
Houlby		aucune en 15 min	15 min
Water Resources Commission of South Wales	pression maximale	aucune en 15 min	15 min
California Dept of Water Resources	pression maximale	aucune	
US Corps of Eng.	pression maximale	aucune	
Weaver	1) 75 % pression maximale 2) diverses pressions	aucune < 1 pi ³ (28.3 l) / 10 min	

4.4.3 Débit

Il est aussi important d'estimer et de surveiller le débit d'absorption d'une injection. Ce débit varie en fonction des caractéristiques rhéologiques du coulis (poids spécifique, viscosité, seuil de cisaillement, etc.), de la pression appliquée et des caractéristiques du milieu (ouverture de la fissure, perméabilité, etc.). Les données recueillies durant les essais exploratoires sont autant utiles pour estimer le débit d'absorption de coulis que pour estimer la pression maximale ou de refus.

Il faut aussi surveiller le comportement de l'absorption durant le déroulement d'une injection. Celle-ci permet de détecter des anomalies ou de changer la recette de coulis qu'on

injecte. Ainsi, dès le début de l'injection, on doit vérifier le débit d'absorption pour s'assurer qu'il est conforme à ce que l'on avait estimé. Sinon, on doit réagir en épaississant ou en diluant la recette selon que le débit est trop grand ou trop petit pour éviter d'injecter des coulis trop maigres inutilement ou de bloquer prématurément l'accès à la fissure en la laissant partiellement injectée.

Il est intéressant de suivre le déroulement de l'injection à l'aide de graphique illustrant le débit en fonction du temps (Figure 4.16). Le moment où le débit atteint son maximum devrait arriver le plus tôt possible pour profiter de la mobilité maximale du coulis avant qu'il ne commence à durcir. Ainsi, au début, on devrait assister une augmentation graduelle du débit qui suit l'augmentation graduelle de la pression. Par la suite, une fois la pression de croisière atteinte, le débit devrait commencer à diminuer graduellement jusqu'au refus. Il peut arriver que la courbe de l'absorption ne respecte pas l'allure de la courbe typique. On peut alors déceler des anomalies: comme un débit élevé pour une période prolongée et comme une hausse soudaine ou graduelle du débit. Les figures 4.17 et 4.18 donnent un exemple de l'allure des courbes de ces anomalies. Dans le premier cas (figure 4.17), où le débit demeure presque constant presque à sa valeur maximale, le coulis devrait être épaissi puisque le trou et la fissure acceptent le coulis trop facilement. Dans le deuxième cas (figure 4.18), on assiste à une augmentation du débit: ceci indique probablement qu'il y a eu déplacement ou qu'il y a des fuites. On doit alors réagir rapidement pour éviter les problèmes: on peut alors décider de limiter les déplacements en compensant pour les pertes comme le montre la figure 4.19. Une autre solution tire plutôt profit de la thixotropie des coulis: on procède à une injection intermittente. La pénétration du coulis est alors restreinte, ce qui limite les forces de soulèvement. Deere suggère un guide qui donne un aperçu de l'importance des débits. Ce guide est présenté au tableau 4.7. [Houlsby, 1990]

Tableau 4.7 Importance des débits (Houlsby, 1990)

Débit	kg/m
Très grand	> 400
Grand	201 à 400
Modéré à grand	101 à 200
Modéré	51 à 100
Faible à modéré	26 à 50
Faible	0 à 25

Une évaluation postmortem est aussi très utile pour savoir, si l'injection a été menée adéquatement, i.e. si l'on a suivi les procédures et si l'on a injecté un coulis de qualité suffisante.

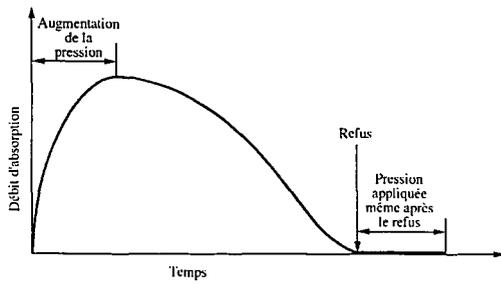


Figure 4.16 Évolution du débit dans le temps (Houlsby, 1990)

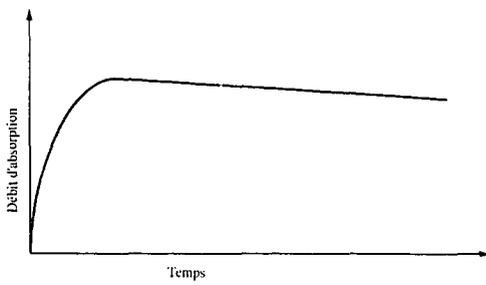


Figure 4.17 Débit élevé sur une période prolongée

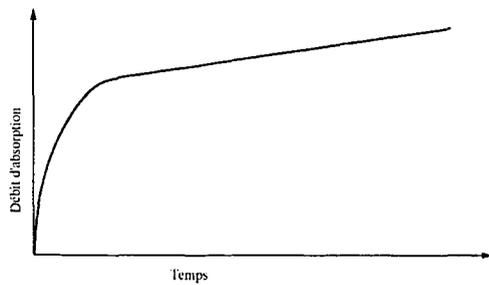
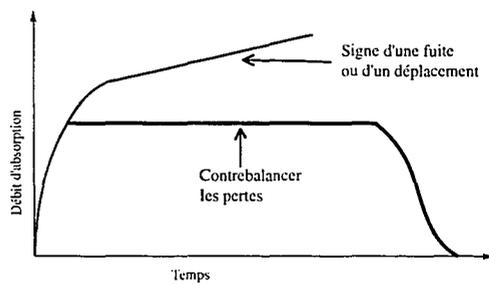
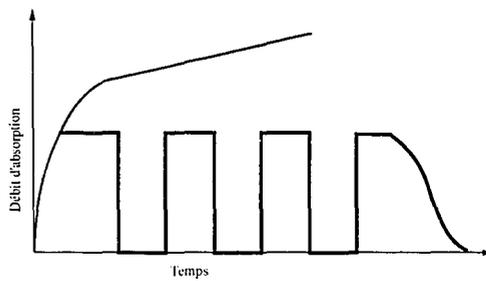


Figure 4.18 Débit incontrôlable causé par une fuite ou des déplacements (Houlsby, 1990)



a) Traitement d'une fuite en contrôlant le débit



b) Injection intermittente

Figure 4.19 Traitements des anomalies (Houlsby, 1990)

4.5.4 Relation pression-débit

Pour suivre et analyser une injection, il importe, non seulement de surveiller la pression et le débit en fonction du temps séparément, mais aussi de comparer leur comportement. Cette analyse fait ressortir des points intéressants. Elle permet entre autre de détecter des déplacements ou des fuites si le débit augmente subitement accompagné d'une baisse soudaine de la pression. Elle permet aussi de prévoir l'approche de la fin de l'injection quand le débit diminue graduellement alors que la pression augmente ou reste stable (Figure 4.20). Il est aussi important de contrôler le débit même si la pression demeure stable, puis qu'une augmentation du débit peut, elle aussi, causer des déplacements ou de la

fracturation hydraulique. D'un autre côté, si la pression ou le débit sont insuffisants, l'injection résultante est de mauvaise qualité.

C'est d'ailleurs pour ces raisons et parce que les autres méthodes préconisent qu'on garde constant l'un ou l'autre des paramètres en variant l'autre que Lombardi analyse plutôt ces paramètres comme un seul, l'énergie injectée (Pression x Volume). Il a donc développé une méthode d'injection qui en tient compte (section 4.3.2).

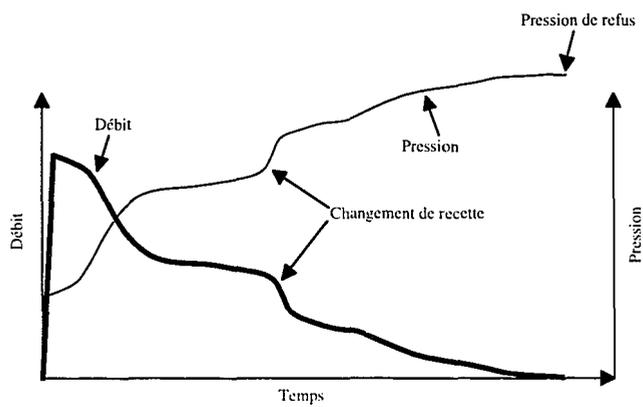


Figure 4.20 Courbes du débit et de la pression (Houlsby, 1990)

5.0 Injections expérimentales en laboratoire

5.1 Travaux en laboratoire antérieurs

Essayer de comprendre comment s'écoule et se comporte le coulis au sein des fissures ainsi que déterminer quels équipements, méthodes ou produits sont les plus appropriés pour mener à bien une injection de qualité et durable intéressent depuis longtemps les personnes et organismes oeuvrant dans ce domaine. Beaucoup d'auteurs se sont attardés à l'étude des produits, de leur rhéologie ou aux lois de l'écoulement, d'autres ont analysé les résultats de véritables chantiers d'injection, alors que peu d'entre eux se sont concentrés sur la simulation en laboratoire d'une injection. Cette présente section se penche surtout sur ce dernier aspect de la recherche et mentionne les résultats des travaux antérieurs.

D'ailleurs déjà en 1956, le U.S. Corps of Engineers s'intéressait à déterminer la pénétrabilité de diverses ouvertures de fissures [Houlsby, 1990]. Les essais consistaient à injecter des fissures horizontales artificielles créées en superposant deux dalles de béton de 1,32 m x 0,18 m x 0,76 m. Différents agencements ont servis à simuler des fissures de 0,25 mm, de 0,50 mm et 0,76 mm ayant des surfaces lisses ou rugueuses. On s'est servi d'un malaxeur à palmes pour mélanger un coulis de ciment type 20 de faible qualité. Durant ces injections expérimentales, on a mesuré le débit et la distribution des pressions le long de la fissure; par la suite, on a laissé le produit mûrir avant de séparer les dalles pour inspecter la qualité de ces injections.

Même si la procédure utilisée ne représentait guère la réalité d'une véritable injection, elle a permis de tirer des conclusions intéressantes. On a constaté que la pression d'injection influence grandement la capacité d'un coulis à pénétrer une fissure. L'analyse de la distribution de la pression montre qu'elle n'est pas linéaire et que le comportement thixotropique des coulis existe bel et bien, alors que la séparation des dalles démontrait que seulement les injections de coulis épais (E/C vol. de 0,5 à 0,7) résultaient en des réparations de bonne qualité. Par contre, en aucun temps, on n'a pu observer une adhérence à la dalle supérieure. De ces injections, on a aussi conclu que, contrairement à ce que plusieurs croyaient à cette époque, une pression élevée ne peut pas expulser le surplus d'eau des coulis maigres.

Plus tard, soit en 1981, la Water Conservation and Irrigation Commission a voulu approfondir ces essais menés par le U.S. Corps of Engineers et examiner les effets du malaxage, du pompage et des diverses techniques sur la qualité de l'injection. C'est d'ailleurs pourquoi on s'est servi des équipements et des techniques utilisés en chantier afin de mieux simuler les conditions d'une véritable injection. On s'est attardé à injecter des fissures avec des ouvertures qui s'amincissent passant de 3 à 0 mm ou de 1,5 à 0 mm, formées en joignant deux dalles de 0,90 m x 0,90 m x 0,05 m. Les résultats ont démontré que les fissures les plus fines (1,5 à 0 mm) étaient mieux injectées par des coulis de E/C vol. de 3 tandis que les coulis plus épais de l'ordre de E/C vol. de 1 sont meilleurs pour réparer les fissures plus ouvertes. Ces essais ont aussi démontré que les coulis très maigres (E/C vol. de 8) ne faisaient que laisser des traces au lieu de vraiment réparer. Ceci poussait les auteurs à conclure qu'afin d'obtenir une injection de qualité et durable, il fallait réduire au minimum la quantité d'eau dans la recette des coulis et à suggérer d'utiliser en tout temps des coulis de E/C vol. inférieur à 3. De plus, il s'est avéré que la combinaison du malaxeur colloïdal et de la pompe de type Moyno a donné des résultats plus convaincants que ceux obtenus du malaxeur à palmes et de la pompe à piston.

5.2 Problématique et objectifs

En 1987, suite aux problèmes rencontrés durant l'injection d'un de ses barrages, la Région Manicouagan de l'Hydro-Québec a décidé de mettre sur pied avec la collaboration de différents intervenants, dont l'équipe Béton du Service Technologie des matériaux de l'IREQ, un groupe de recherche sur l'injection. Ainsi, dans le cadre du «*projet D3: Développement des méthodes et des produits d'injection dans les structures de béton*», on a installé à Baie-Comeau un centre d'essais afin d'étudier les produits, l'équipement et les méthodes appropriés pour l'injection des fissures de faible ouverture ainsi que les effets de l'injection sur une structure en béton.

L'objectif de ces travaux visait à simuler le plus fidèlement possible l'injection d'une fissure plongeante ouverte et communicante avec le réservoir d'un barrage de béton. Dans la première phase, plusieurs produits ont été étudiés: on a procédé à des essais sur des coulis frais et des coulis durcis à différentes températures pour évaluer la performance des époxy et des coulis à base de ciment Portland ou de ciment microfin. Suite à ces essais de caractérisation, il était nécessaire d'étudier le comportement des produits les plus prometteurs lors d'injection de même qu'évaluer les différents équipements, instruments et méthodes.

Cette étude entre dans la deuxième phase du projet et les principaux objectifs sont:

- simuler le plus fidèlement possible une fissure de traction d'un barrage de béton;
- simuler les conditions d'expositions d'une fissure communicante avec le réservoir;
- injecter avec équipements et selon des méthodes utilisés en chantier des fissures dans des dalles suffisamment grandes pour obtenir des résultats représentatifs;
- tester les produits les plus prometteurs;
- étudier les effets de l'ouverture de la fissure et de la rhéologie des coulis sur la pénétration et sur la distribution de la pression;
- étudier les différentes méthodes d'injection;
- évaluer les effets des divers équipements et instruments de mesure sur le déroulement et sur la qualité de l'injection.

5.3 Fabrication des dalles

Les dalles ont été fabriquées selon des critères très précis pour faciliter la propagation d'une fissure de traction unique initiée par fracturation hydraulique. Il était aussi important d'injecter des dalles de dimensions appréciables pour permettre d'avoir des résultats plus représentatifs et pour avoir la chance d'utiliser les véritables équipements d'injection. C'est ainsi que l'on a conçu des dalles de 2,62 m x 1,42 m x 0,40 m coulées en trois couches: les couches supérieure et inférieure de béton armé fibreux de haute résistance (50 MPa) et la couche centrale de béton de plus faible résistance (15 MPa), où la fissure devrait se propager. Pour faciliter l'initiation et la propagation de cette fissure, on a décidé de créer un joint froid de construction en coulant la couche centrale en deux étapes en plus d'y installer un initiateur de fissure, composé de carton fibre sur lequel est déposé du sable grossier.

De plus, 29 tuyaux ont été ajoutés pour permettre d'intercepter et d'injecter la fissure et de mesurer la distribution des pressions de même que 12 tiges pour mesurer les déplacements qui pourraient se produire durant l'injection. Dans le but de contrôler l'étanchéité de la fissure, il a fallu placer une lame de PVC à la hauteur du joint froid à 10 cm du pourtour de la dalle pour être en mesure de bâtir cette pression.

5.4 Banc d'essai

Ces dalles, une fois le béton mûri et les trous d'injection forés, sont assises dans le bâti de rétention. On a d'ailleurs conçu ce bâti pour contrôler l'ouverture initiale de la fissure et pour restreindre les déplacements à moins de 0,5 mm pour une pression d'injection inférieure à 1400 kPa. La fonction de ce bâti est en quelque sorte de simuler le poids propre de la structure au-dessus de la fissure [Bouja, 1995]. Pour y arriver, on a donc dû construire un bâti très rigide et tirer profit de la précontrainte que l'on peut appliquer grâce aux huit tiges filetées en périphérie, capables d'appliquer une force de plus de 7200 kN.

Ce bâti est lui même placé dans une chambre climatique où un dispositif permet de régler la température et l'humidité relative. Pour les fins de ces injections, la température a été fixée à 4°C. et l'humidité relative à environ 90 %, des valeurs qui représentent les conditions existantes en amont d'un barrage de béton.

Une fois la dalle correctement installée dans le bâti, la fissuration est initiée par fracturation hydraulique. L'eau à grand débit est acheminée par une pompe de surpression vers l'initiateur de fissure, installé à une extrémité de la dalle, en gardant tous les autres points de sortie fermés. Ceci occasionnera une augmentation généralisée de la pression et engendrera une fissure plane et horizontale suivant le plan de faiblesse associé au joint froid.

5.5 Équipements et instrumentation

Un des objectifs du projets étant de définir les équipements, les instruments et les méthodes les plus efficaces, on doit utiliser ceux dont on se sert en ce moment ou tester ceux qui sont susceptibles de servir éventuellement. Afin de simuler une injection à échelle réelle et d'assurer la réussite des travaux d'injection, l'équipement suivant a été utilisé:

- un débitmètre et un contrôleur de dosage;
- un malaxeur colloïdal à grande vitesse, qui permet un malaxage énergétique du coulis;
- un bac de rétention de coulis muni d'un agitateur et d'un capteur de température relié au système d'acquisition de données;
- une pompe à piston de grande capacité permet une circulation rapide du coulis avec un débit maximal de 130 l/min. Elle permet également, grâce à ses deux

niveaux d'opération, de pomper le coulis à des pressions très élevées, de l'ordre de 5500 kPa, mais avec un débit limité à 55 l/min;

- un débitmètre et un capteur de pression pour déterminer le débit et la pression au point d'injection (relié au système d'acquisition de données);
- une valve en céramique pour contrôler la pression au point d'injection;
- une valve automatique de contrôle de la pression d'injection (dalle 33 seulement);
- une ligne de retour de coulis vers l'agitateur;
- une ligne simulant une tête d'eau effective d'environ 10 m (98 kPa) ayant deux lignes en parallèle et un dispositif de nettoyage pour éviter toute sédimentation.

Par ailleurs pour suivre le déroulement et la performance de l'injection, cette dalle, placée dans une chambre climatique équipée de capteurs de température et d'humidité, était équipée:

- de 24 capteurs de pression;
- de 12 capteurs de déplacement de type LVDT;
- de 8 cellules de charge;
- des manomètres placés à la sortie de la pompe et à l'entrée du point d'injection.

Tous ces instruments sont reliés au système d'acquisition de données. Le réseau complet est illustré à la figure 5.1.

5.6 Coulis d'injection

Pour chaque injection, six mélanges du produit à injecter sont sélectionnés à partir des gammes de rapports E/C recommandés par les études réalisées antérieurement dans le cadre de ce projet sur une large gamme de ciments Portland et de ciments microfins. Avant l'utilisation de ces coulis, une deuxième étude complète des caractéristiques rhéologiques et physiques des mélanges sélectionnés doit être réalisée au Laboratoire Béton à l'IREQ. Les résultats de cette étude sont mis à la disposition de toute l'équipe d'injection avant le début des travaux. Le passage d'un mélange à l'autre durant les travaux peut se faire à partir de critères rationnels.

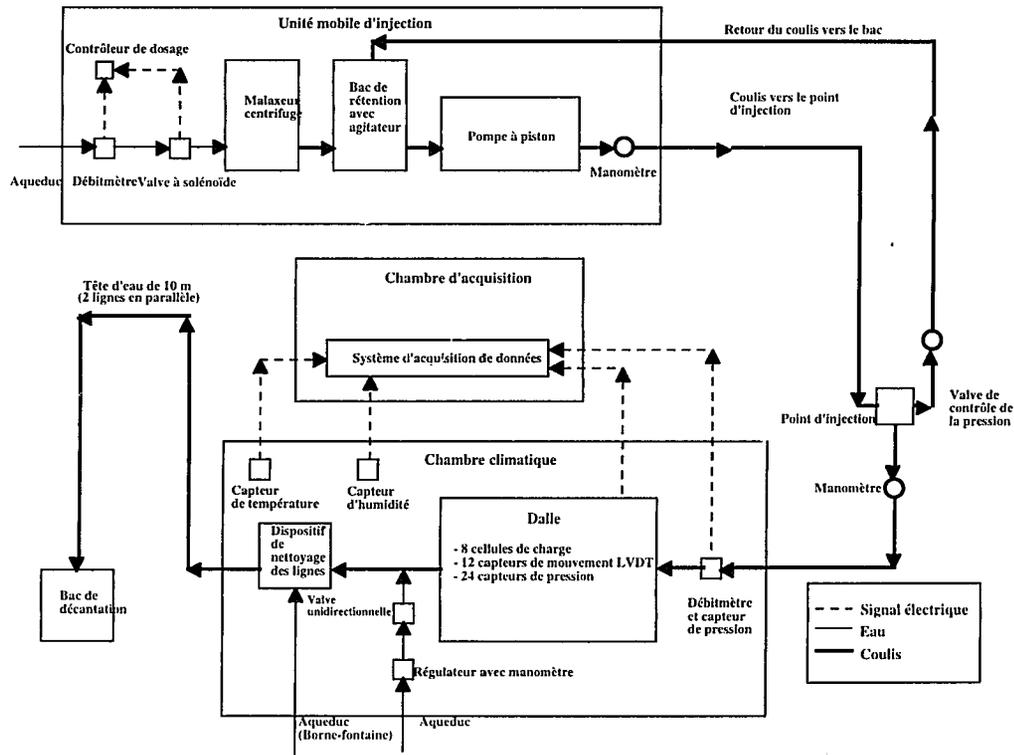


Figure 5.1 Réseau des équipements et instruments

5.7 Injection

Par la suite, les étapes préparatoires terminées, l'essai d'eau, servant à évaluer l'intercommunication de la fissure et à saturer la dalle, peut débuter. Cet essai, où le coulis est simplement remplacé par de l'eau, est effectué à l'aide de l'équipement d'injection. Après avoir vidangé tout le système, l'injection comme telle est entreprise. Le choix du point d'injection initial est basé sur les résultats de l'essai d'eau et s'arrête habituellement sur un point central qui montrait une bonne absorption. À partir de ce point, la dalle est injectée jusqu'au colmatage complet en adoptant la procédure suivante:

- appliquer une tête d'eau d'environ 10 m (98 kPa) à un des points de la dalle;
- ouvrir toutes les valves sur la dalle;
- commencer l'injection avec un coulis, dont le rapport E/C varie selon le produit utilisé. Habituellement, une pression au point d'injection de 1500 à 2000 kPa doit être maintenue;
- fermer la valve chaque fois que l'eau suivie de coulis s'y présente et poursuivre l'injection après la fermeture de toutes les valves en maintenant l'entrée de la tête d'eau ouverte durant toute l'injection;
- épaissir le coulis si le débit demeure élevé ou changer le point d'injection si le débit d'injection diminue rapidement ou s'annule malgré une pression élevée ou qui augmente;
- arrêter l'injection si le débit d'injection reste nul même après des changements de point d'injection.

5.8 Carottage et séparation des dalles

L'injection terminée, la dalle subit dans la chambre climatique une cure de 28 jours à 4°C et à 90 % d'humidité relative. Ensuite, des carottes sont prélevées dans la dalle. Le prélèvement des carottes, qui peuvent servir à déterminer la qualité de l'injection par un examen visuel et d'autres tests (la résistance à la traction et à la compression), est fait de manière à couvrir en entier la dalle. La dalle 31 a aussi été séparée en deux au niveau de la fissure, ce qui a permis de constater la pénétration, l'hydratation et l'adhérence du coulis.

6.0 Résultats et analyse des résultats

Ainsi, depuis 1989, 12 dalles ont été injectées en laboratoire. D'ailleurs, les paramètres les plus importants de ces injections expérimentales sont résumés au tableau 6.1. Cependant, dans ce mémoire, seuls les résultats de l'injection des dalles 31, 32 et 33 seront présentés en détail.

De cette manière, on traitera et analysera les résultats enregistrés à l'aide du système d'acquisition de données comprenant les données de la pression et du débit au point d'injection, celles aux 24 capteurs de pression, celles des réactions aux 8 cellules de charge de même que celles des déplacements aux 12 capteurs de type LVDT. Les résultats du carottage et de la séparation des dalles y sont aussi exposés.

Tableau 6.1 Résumé des injections des grandes dalles à l'Hydro-Québec

Dalle	Date	Produits	Adjuvants	E/C Vol.	Ouvert de la fissure (mm)	Nomb. de points d'injec.	Débit initial (l/min)	Pression max. au point d'injec. (kPa)	Durée
3	19/10/89	Époxy Sika Sika 35	-	-	2	1	-	1500	1 h 03
5	28/11/91	Portland type 10	-	5 3 2 1.33 1	1 à 3	1	-	1000	16 h 40
15	12/07/90	Époxy Concrecive 1380 Mulco (M80)	-	-	-	1	-	1000	1 h 23
17	20/03/91	Portland type 10	0,5 % Interplast N	5 3 2 1.33 1	1 à 2	1	-	920	10 h 15
23	19/03/92	Époxy Concrecive 1468 Mulco (M68)	-	-	0,5 à 3	1	-	730	-

27	08/07/92	Portland type 10 SF	-	5 3 2 1,33 1	-	1	-	920	-
29	11/12/92	Portland type 30	-	5 3 2 1,33 1	-	1	-	-	-
30	21/02/95	Portland type 10	1 % de superplastifiant à base de naphthaline	2	0,2 à 0,3	-	-	-	-
31	24/07/95	Portland type 10	1 % de superplastifiant à base de naphthaline	1,0 0,75 0,6 0,55	0,3 à 0,6	5	12	2500	7 h 56
32	06/09/95	microfin Spinor A12	1 % de superplastifiant à base de naphthaline	1,0	0,1 à 0,4	8	10	2800	2 h 44
33	03/04/96	Portland type 30	1 % de superplastifiant à base de naphthaline	0,7 0,6	0,3 à 0,6	4	4,5	2600	2 h 06
34		microfin Lanko 737	-	1 0,75 0,6 0,5 0,4	0,45 à 0,75	2	12	2700	4 h 10

6.1 Dalle 31

Le 24 juillet 1995 au Laboratoire Béton de la VPTI (Hydro-Québec), on a injecté la dalle en béton no 31, que l'on peut voir à la figure 6.1. Cette dalle, fabriquée le 16 juin 1992, avait été placée dans le bâti et fissurée 5 jours avant l'injection, soit le 19 juillet 1995.

Pour l'injection de cette dalle, un coulis à base de ciment Portland type 10 additionné d'un superplastifiant à base de naphthaline (1 %) a été utilisé. La composition des mélanges testés et leurs caractéristiques rhéologiques (Tableau A1) ainsi que toutes les courbes nécessaires à l'analyse des résultats et toutes les photos concernant l'injection de la dalle 31 sont présentées à l'annexe A.

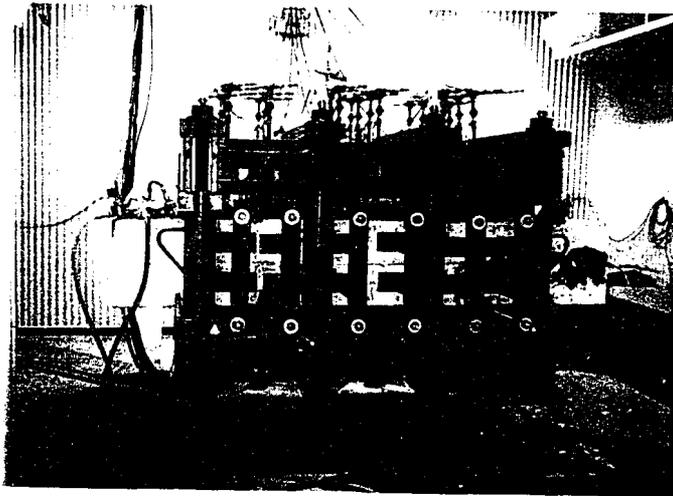


Figure 6.1 Dalle 31 dans le bâti métallique

Injection

Vers 6 h 50 (24 juillet 1995), le système de malaxage, incluant le contrôleur de dosage, le malaxeur hélicoïdal et le bac de rétention avec agitateur, ainsi que la pompe à piston ont été vérifiés et testés.

Vers 8 h 50, on a effectué à l'aide de la pompe un essai d'eau au point 15: toutes les valves ont coulé au même moment. Par la suite, tout le système d'injection a complètement été vidangé.

L'injection, proprement dite, a débuté au point 15 vers 9 h 55 ($t = 0$ min) avec l'utilisation d'un coulis de ciment Portland type 10 de rapport volumique $E/C = 1,0$ (E/C massique $\approx 0,75$) avec 1 % en extrait sec de superplastifiant à base de

naphtaline. La pression oscillait entre 1500 et 2200 kPa à ce premier point d'injection. Par contre, le débit d'absorption et la pression aux autres points sont restés nuls, ce qui peut être expliqué par l'obturation du point d'injection: on a donc décidé de transférer le point d'injection au point 10.

Vers 10 h 09 ($t = 14$ min), l'injection a recommencé au point 10 en utilisant toujours la même composition de coulis. Il faut noter qu'à aucun moment lors d'un changement de point d'injection la composition du coulis n'a été modifiée. Ces changements de composition sont seulement survenus dans la dernière partie de l'injection et leurs effets sont d'ailleurs analysés ultérieurement. Après ce premier changement de point d'injection, la pression observée au point d'injection était de l'ordre de 1600 à 2100 kPa et il y a eu un délai de 4 à 5 min avant que le coulis n'atteigne les autres points et qu'une certaine pression ne se bâtit. (Figures A3 à A6) La pénétration peut être visualisée à l'aide d'une courbe d'isopénétration (Figure 6.2), qui représente le temps nécessaire au coulis pour qu'il atteigne les différents points de la dalle. Cette courbe permet de mieux évaluer l'intercommunication de la fissure. On peut ainsi constater que la fissure était plus fine ou en partie colmatée par les précédents essais d'eau dans la région des points 12, 15 et 16.

Malheureusement, la pression est demeurée nulle ou presque aux points 15 et 16, démontrant qu'ils étaient effectivement colmatés ou bouchés. L'absorption du coulis était alors de 5 à 7 l/min. (Figure A2) Cette absorption diminuait à un rythme plutôt régulier jusqu'à devenir nulle vers 11 h 53 ($t = 118$ min), ce qui signifiait le colmatage du point 10 et l'obligation de changer de point d'injection. Pendant cette période de 10 h 09 ($t = 14$ min) à 11 h 53 ($t = 118$ min), les pressions aux autres points étaient passablement constantes et les variations enregistrées provenaient surtout de la pompe à piston. Les points 11 et 14, près du point d'injection, montraient des pressions d'environ de 800 kPa, alors que tous les autres points, exceptés 12, 15 et 16 où les pressions étaient nulles, affichaient des pressions d'environ 300 à 500 kPa. Des courbes d'isopression, montrant la distribution des pressions au sein de la fissure, peuvent être tracées à tout moment durant l'injection, mais il a été choisi de seulement présenter celle peu après le changement de point d'injection survenu à 10 h 09 ($t = 14$ min) (Figure 6.5). Cette figure montre que la pression diminue rapidement au fur et à mesure que l'on s'éloigne du point d'injection. La géométrie de la fissure de même que la viscosité et la cohésion du produit d'injection ont une influence certaine sur ce comportement. Au commencement, les courbes d'isopression réagissent comme les courbes d'isopénétration puisque la pression se bâtit aux différents points à mesure que le coulis les atteint. Par contre, une fois que le coulis a complètement envahi la fissure, ces courbes deviennent sensibles aux

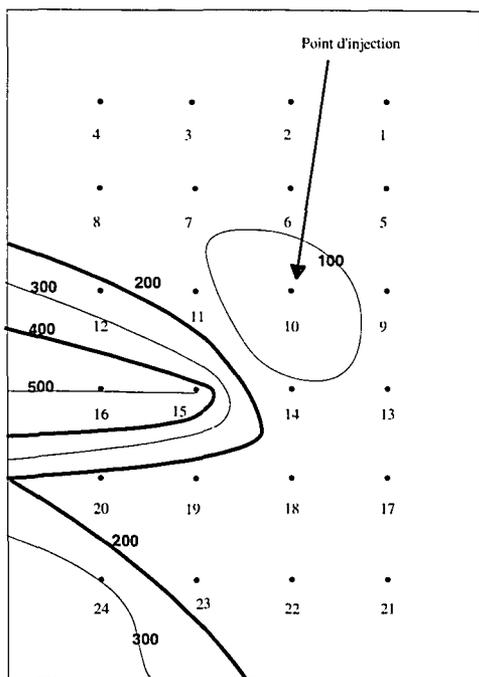


Figure 6.2 Courbe d'isopénétration (sec) de la dalle 31

fluctuations de la pression au point d'injection. Cette sensibilité s'atténue avec le colmatage progressif de la fissure. Les figures 6.3 et 6.4, qui montrent le profil de la pression durant l'injection, permettent de mieux visualiser ces comportements. Ainsi, à la figure 6.3, on remarque que les différentes pressions vont réagir presque immédiatement aux variations de la pression au point d'injection. Par contre, au fur et à mesure que la fissure se colmate, les pressions aux autres points vont devenir de moins en moins sensibles. Ceci peut être observé à la figure 6.4, illustrant le profil de la pression vers la fin de l'injection. À ce stade, il est clair que, malgré une fluctuation tout de même importante de la pression au point d'injection, les pressions environnantes demeurent plutôt constantes: résultat laissant présager un certain colmatage de la fissure.

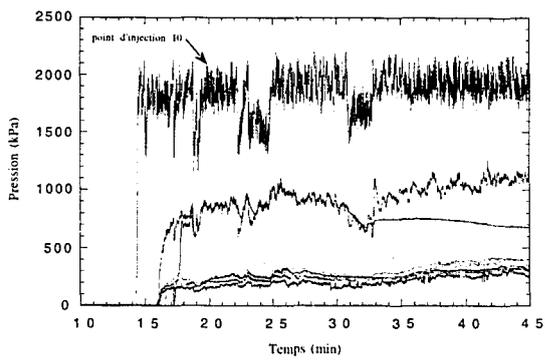


Figure 6.3 Profil de la pression au début de l'injection aux différents points sur la dalle 31

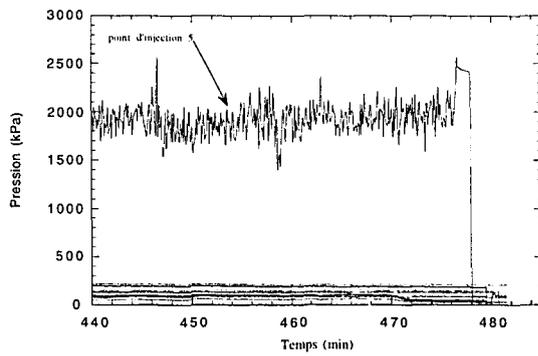


Figure 6.4 Profil de la pression à la fin de l'injection aux différents points sur la dalle 31

points sont demeurées constantes ou nulles. Le point 9 était donc colmaté: un changement de point d'injection s'avérait nécessaire.

Vers 12 h 58 (t = 183 min), l'injection s'est poursuivie en utilisant désormais le point 6 comme point d'injection. À partir de ce moment et jusqu'à 13 h 10 (t = 195 min), les résultats ne peuvent pas être considérés parce que la valve de purge de la tête d'injection était demeurée ouverte à cause d'une défectuosité. Toutes les données couvrant cette période ne sont donc pas représentatives. En effet aussitôt cette valve fermée, le débit est devenu nul, ce point était lui aussi colmaté. Les valeurs des pressions environnantes le confirmaient aussi: elles sont toutes restées nulles ou constantes.

Vers 13 h 19 (t = 204 min), il fallait recommencer l'injection à un autre point et le point 5 était choisi à cet effet. Une pression de 1400 à 1900 kPa y était appliquée. Encore une fois, c'est seulement après un certain délai que l'on a pu mesurer l'effet sur les autres points. Ceux-ci ont tous augmenté à des pressions de 350 à 500 kPa, sauf les points qui étaient déjà colmatés, i.e. 8, 12, 15, 16, 18, 19, 20, 23 et 24. Par la suite vers de 13 h 23 (t = 208 min), la sortie de coulis a été volontairement obturée. Ceci a permis à une pression de se bâtir au niveau de la fissure et on a pu constater vers 13 h 32 (t = 217 min) une augmentation généralisée des pressions maintenant mesurées à environ 1000 kPa. Peu de temps après, la tête d'eau a été rouverte et les pressions sont redevenues normales et ont même commencé à diminuer ou à demeurer constantes: le colmatage progressif de la fissure en était sans doute la cause.

Bien qu'elle n'ait pas été affectée par l'obturation de la sortie de coulis, l'absorption du coulis a tout de même suivi une tendance similaire à celle des pressions après la réouverture de la sortie de coulis: elle diminuait constamment jusqu'à devenir pratiquement nulle vers 17 h 43 (t = 470 min), ce qui allait éventuellement mettre fin à l'injection à 17 h 52 (t = 477 min). (Figure A2)

Durant la dernière partie de cette injection, soit de 13 h 19 (t = 204 min) à 17 h 52 (t = 477 min), aucun changement de point d'injection n'a été effectué, cependant le coulis a été modifié à trois reprises afin de réduire le débit d'absorption. La première fois vers 14 h 55 (t = 300 min), le débit est resté stable à près de 5 l/min. Le rapport E/C volumique est alors passé de 1,0 (E/C massique = 0,75) à 0,75 (E/C massique = 0,56) avec 1 % en extrait sec de superplastifiant. Même s'il a eu des effets négligeables sur la pression à la tête d'injection, le changement de composition s'est fait ressentir aux autres points avec un léger délai, explicable

par la présence du mélange initial dans le système. Cette diminution de la fluidité a permis aux pressions de ces autres points de se stabiliser à des valeurs comprises entre 150 à 450 kPa. (Figures A3 à A6)

Le second changement de composition, qui a été effectué parce que le débit demeurait stable à environ 3 l/min, qui donnait un mélange avec un E/C volumique de 0,6 (E/C massique \approx 0,45) avec 1 % en extrait sec de superplastifiant à base de naphthaline, est survenu vers 16 h 32 (t = 397 min): il a, lui, affecté la pression au point d'injection, celle-ci passant de 1400 à 1900 kPa avec de grandes amplitudes. L'effet sur les autres points était négligeable, si ce n'est, environ 10 min plus tard, une baisse d'environ 50 kPa pour certains points. Cette fois contrairement à la première où il était demeuré plutôt constant, le débit a diminué rapidement. Le dernier changement dans la composition, où un E/C volumique de 0,55 (E/C massique \approx 0,41) avec 1 % en extrait sec de superplastifiant à base de naphthaline était désormais utilisé, a eu lieu vers 17 h 24 (t = 446 min) et a encore une fois provoqué une augmentation de la pression au point d'injection, qui passait au-delà de 2000 kPa et même à 2500 kPa à certaines occasions. Mais ceci n'a aucunement influencé les autres pressions et le débit diminué à un niveau très bas. Cela laissait présager la fin imminente de l'injection.

Vers 17 h 45 (t = 470 min), l'absorption est finalement devenue nulle et ce qui s'est aussi répercuté sur d'autres points, i. e. 1, 2, 3, 7, 9 et 13, où une chute de pression momentanée de 75 kPa a pu être observée. L'injection s'est terminée à 17 h 52 (t = 477 min) lorsque le débit est resté pratiquement nul pendant près de 7 min. (Figures A2 à A6)

Comme la pression d'injection du coulis dans la fissure crée une force agissant sur tout le système dalle-bâti, on devait examiner parallèlement les pressions aux différents points et les réactions aux cellules de charges; on s'aperçoit qu'ils suivent des tendances similaires comme le démontrent les figures A7 et A8. Ainsi, si les pressions augmentent, les tensions vont, elles aussi, augmenter et elles diminueront lorsque les pressions diminueront. C'est pourquoi au début de l'injection vers 10 h 11 (t = 16 min), on assiste à une augmentation de la tension dans toutes les tiges filetées, ce qui est causé par l'application initiale de la pression d'injection. Des effets semblables sont aussi remarqués vers 13 h 30 (t = 215 min) au moment où la tête d'eau venait d'être obturée pour provoquer une augmentation substantielle généralisée de la pression. Les forces lues par les cellules de charge ont elles aussi augmentées, mais elles ont diminué sitôt la réouverture de la tête d'eau. Par ailleurs, on peut

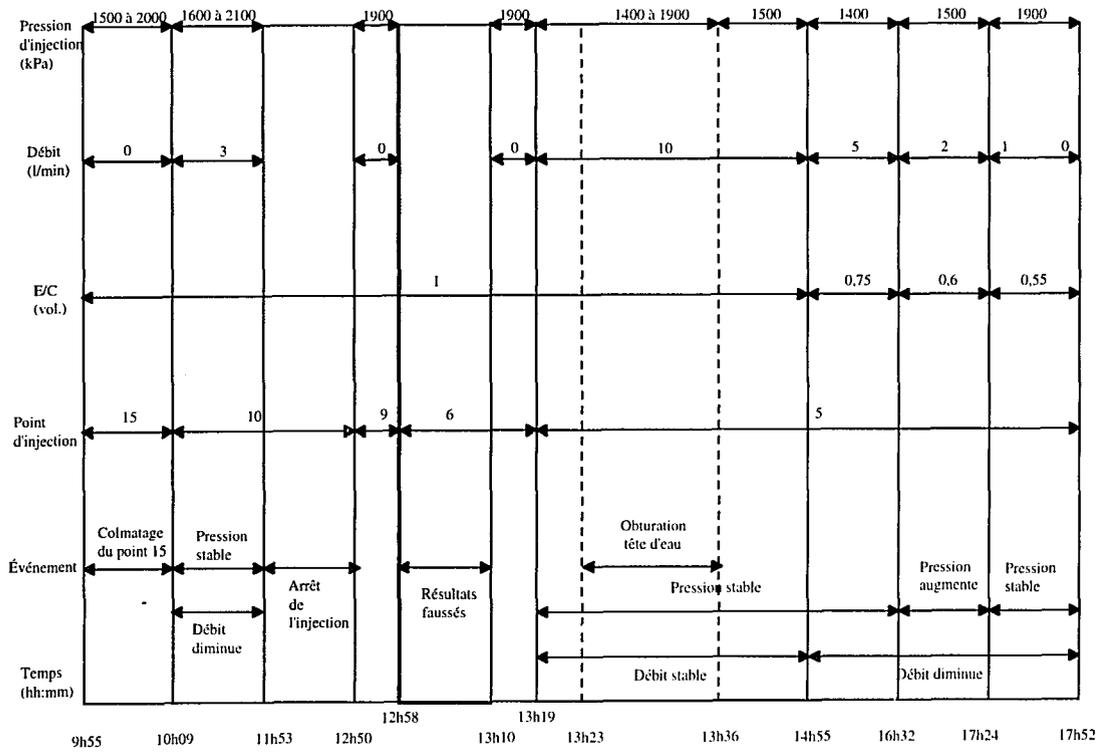


Figure 6.6 Résumé du déroulement de l'injection de la dalle 31

remarquer qu'à mesure qu'avancait l'injection et donc le colmatage de la fissure, les réactions aux tiges demeuraient constantes ou même diminuaient en dépit d'une augmentation importante de la pression au point d'injection. Ceci est normal puisque les surfaces, sur lesquelles les pressions sont appliquées, diminuent avec le colmatage progressif.

Pour être en mesure de déterminer précisément la relation qui puisse exister entre la pression appliquée et les réactions aux différentes tiges filetées du bâti, une analyse détaillée ainsi qu'une série de mesure in situ sur le bâti s'imposeraient. Par ailleurs, l'information retirée serait peu pertinente et serait une redondance en soit de la mesure des pressions.

Quoi qu'il en soit, on sait que le bâti a été preserré à près de 7200 kN, soit environ 900 kN par tige. Ce preserrage est nécessaire afin de garder stable tout au long de l'injection l'ouverture de la fissure. Cette précontrainte atténue l'effet de la force exercée par la dalle sur les tiges de serrage de façon très significative: la force générée par la pression au niveau de la fissure provoquera une augmentation de la tension dans la tige de seulement 5 à 10 % de la force totale appliquée. Malgré cette précontrainte de réaction très importante, une ouverture de la fissure est toujours possible si les niveaux de pression appliquée et les surfaces d'application sont importants. Les déplacements lus durant l'injection de la dalle 31 ont été très petits et à la limite de résolution des capteurs de déplacement (LVDT). En effet, le déplacement maximal est survenu lors de l'obturation de la tête d'eau et il était d'environ 0,08 mm, alors que le reste du temps, les déplacements étaient sous les 0,05 mm. (Figures A9 et A10) On attribue ceci au fait que premièrement la fissure est drainante donc il est impossible d'élever les pressions à des valeurs très importantes sur toute la dalle et deuxièmement par la chute de pression importante observée entre le point d'injection et les points périphériques attribuable encore une fois à la nature drainante et à la finesse de la fissure qui contribue à accentuer les pertes de charge. On peut donc conclure que le preserrage du bâti a performé de façon adéquate puisqu'il était destiné à limiter les déplacements à moins de 0,1 mm. On remarque aussi que l'amplitude observée en laboratoire peut malgré tout être importante. C'est pourquoi en chantier, on doit s'attendre à des forces très importantes et il faut donc toujours s'assurer que la pression au niveau de la fissure ne crée pas une force, qui pourrait aggraver le problème de fissuration.

Carottage et séparation de la dalle

Les différentes carottes (Figures A11 à A14) démontrent la réussite de cette injection: le coulis s'est bien propagé pour réparer adéquatement des fissures de 0,1 mm à 0,6 mm.

La séparation de la dalle a, quant à elle, permis de constater que la propagation et l'hydratation du coulis étaient bonnes et uniformes sur toute la superficie de la fissure. Elle a aussi permis de constater que le coulis avait redonné une certaine intégrité structurale à la dalle puisqu'elle a été séparée ailleurs que dans la fissure injectée. Les figures A15 et A16 montrent la séparation de la dalle 31.

6.2 Dalle 32

Pour sa part, la dalle 32, fabriquée le 16 juin 1992 et fissurée le 30 août 1995, a été injectée le 6 septembre 1995 au Laboratoire Béton de la VPTI. La figure 6.7 montre la dalle 32 placée dans le bâti 5 jours avant l'injection. Sur cette photo, on aperçoit aussi la précontrainte latérale, qui a servi à colmater une fuite causée par une fissure indésirable sur la partie supérieure de la dalle.

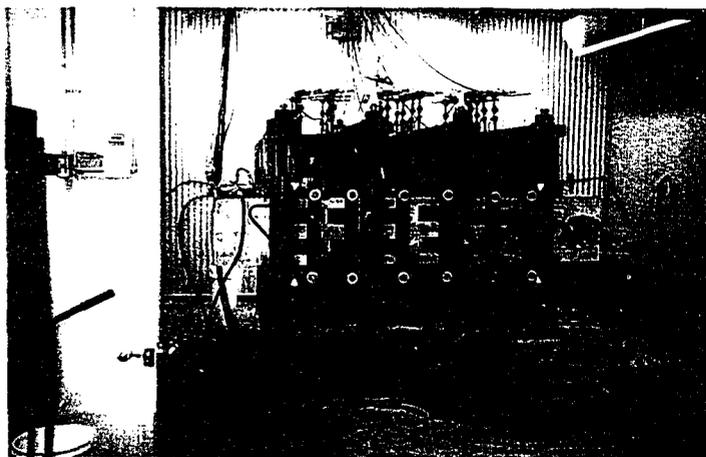


Figure 6.7 Dalle 32 dans le bâti métallique

Pour l'injection de cette dalle, un coulis à base de ciment microfin Spinor A12 additionné d'un superplastifiant à base de naphthaline (1 %) a été utilisé. La composition des mélanges testés et leurs caractéristiques rhéologiques (Tableau B1) ainsi que toutes les courbes nécessaires à l'analyse des résultats et toutes les photos concernant l'injection de la dalle 32 sont présentées à l'annexe B.

Injection

Vers 8 h 00 (6 septembre 1995), le système de malaxage, incluant le contrôleur de dosage, le malaxeur hélicoïdal et le bac de rétention avec agitateur, ainsi que la pompe à piston ont été vérifiés et testés.

Vers 8 h 25, on a effectué à l'aide de la pompe un essai d'eau au point 10: ce point s'est avéré colmaté et on a décidé d'utiliser l'entrée de la tête d'eau (point E) pour estimer la propagation de l'eau. Cet essai a permis de déboucher le point 10, mais il était tout de même préférable de transférer le point d'injection au point 9.

Vers 9 h 06 ($t = 0$ min), l'injection a débuté à ce point 9 en utilisant un coulis de ciment microfin Spinor A12 de E/C volumique égale à 1 (E/C massique $\approx 0,75$) avec 1 % en extrait sec de superplastifiant à base de naphthaline. À ce moment, la pression au point d'injection variait de 1800 à 2000 kPa et il a fallu attendre environ 4 min pour observer des augmentations de pression aux autres points suite à la fermeture progressive des valves au fur et à mesure de l'arrivée du coulis.(Figures B3 à B6) La séquence de pénétration du coulis peut être visualisée à l'aide d'une courbe d'isopénétration (Figure 6.8), qui représente le temps nécessaire au coulis pour qu'il atteigne les différents points de la dalle. Elle permet d'évaluer l'intercommunication de la fissure. On peut ainsi constater que la fissure était plus fine dans la partie centrale du côté des tiges filetées 5 à 8, c'est-à-dire dans les environs des points 12, 15 et 16. On s'aperçoit aussi que la fissure était plus ouverte du côté des tiges 1 à 4 (près des points 1, 5, 9, 13, 17 et 21) et que la propagation se faisait du côté des tiges 1 à 4 vers celui des tiges 5 à 8 (près des points 4, 8, 12, 16, 20 et 24), et ce sur toute la longueur de la dalle.

Pour sa part, l'absorption initiale était très élevée d'environ 37 l/min sûrement à cause du remplissage des tuyaux pour diminuer en moins de 2 min à niveau stable d'environ 2 l/min pour une période de 15 min. (Figure B2) À partir de ce moment, les fluctuations de débit sont apparues: le débit pouvait s'annuler pour quelques instants et par la suite augmenter à 4 l/min pour finalement demeurer nul vers 9 h 34 ($t = 28$ min) au même moment où les pressions

aux différents points ont commencé à diminuer. Ceci a entraîné un changement de point d'injection. Pendant la période où le débit demeurait plutôt stable, les pressions au point d'injection et aux autres points demeuraient aussi passablement stables (1500 à 2200 kPa au point d'injection et 400 à 500 kPa aux points périphériques). La pression au point d'injection s'est mise à varier augmentant même à 2600 kPa, le débit s'annulant et ce, à quelques occasions durant l'intervalle de 9 h 27 (t = 17 min) à 9 h 36 (t = 30 min). On peut aussi remarquer que pendant l'injection, la pression à la plupart des points réagissaient d'une manière semblable et presque instantanée aux fluctuations de pression au point d'injection. Ce sont seulement les points 12, 15, 16, 20 et 24 qui ne semblent pas avoir été affectés, ce qui est plausible puisque la fissure est plus fine à cet endroit.

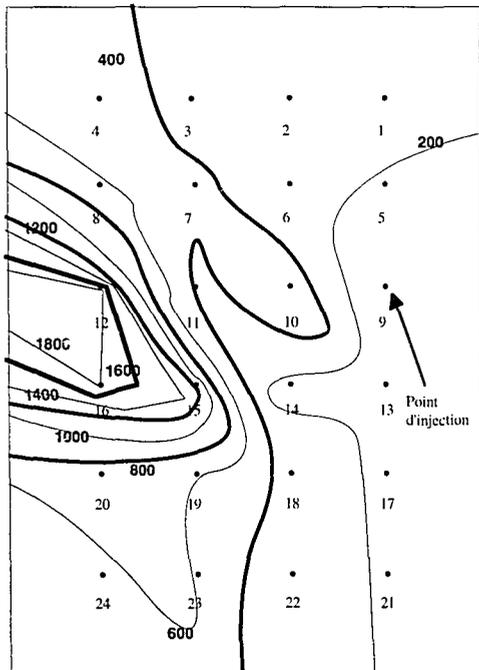


Figure 6.8 Courbe d'isopénétration (sec) de la dalle 32

Ainsi vers 9 h 40 (t = 34 min), l'injection est repartie au point 7. Les pressions aux autres points ont immédiatement augmenté, mais elles ont presque aussitôt commencé à diminuer graduellement même si la pression au point d'injection restait stable à un niveau de 2100 à 2500 kPa. Le débit d'absorption, quant à lui, a réagi comme la pression aux différents points: il était de 4 l/min après ce changement et a diminué jusqu'à devenir nul vers 9 h 44 (t = 38 min) suite à quoi il est devenu irrégulier, variant de 0 à 3 l/min pendant environ 2 à 3 min. Pendant cette période d'instabilité du débit, la pression au point d'injection augmentait, mais n'avait qu'une influence négligeable sur les autres points: signes qu'un changement de point d'injection s'avérait nécessaire.

Vers 9 h 50 (t = 44 min), l'injection a repris son cours au point 14 où la pression oscillait aux alentours des 2200 à 2600 kPa. Alors que les points 7 et 12 n'étaient aucunement affectés, affichant des pressions qui demeuraient constantes ou presque nulles, la pression aux autres points mais surtout aux points 6, 10, 11, 15, 16 et 17 ont initialement monté pour baisser quelques instants plus tard (environ 2 min) et devenir beaucoup moins sensibles aux importantes variations de pression (de 2600 à 1300 kPa) au point d'injection. Pendant ce temps, le débit était d'environ 2 l/min au début et diminuait progressivement vers 0 l/min pour éventuellement réaugmenter vers 10 h 04 (t = 58 min) atteignant même un débit de 3 l/min. Ce phénomène n'était pas normal et était sans doute causé par une fuite au niveau de la tête d'injection, qui rendait erronées les lectures de débits. La valve défectueuse a été changée et l'injection est repartie toujours au même point (point 14) vers 10 h 28 (t = 82 min). Malgré une pression de près de 2300 kPa au point d'injection, le débit et les pressions aux autres points n'ont quasiment pas réagi, signe qu'il était nécessaire de transférer le point d'injection.

Vers 10 h 35 (t = 89 min), l'injection repartait au point 6 avec une pression d'un peu plus de 2500 kPa et la plupart des points, sauf 12 et 14, ont réagi, leurs pressions augmentant légèrement. Par contre, les points de la zone 1 à 12 ont été beaucoup plus affectés avec des augmentations d'environ 300 kPa comparativement à environ 50 kPa pour les points de la zone 13 à 24. La pression d'injection ne s'est jamais vraiment stabilisée et durant ce temps, le débit qui affichait une valeur de plus de 20 l/min immédiatement après le transfert du point d'injection a rapidement diminué à des valeurs très basses (1 l/min) et irrégulières. Lorsqu'il est devenu très bas et que la pression semblait constante, on a décidé de changer l'emplacement du point d'injection. (Figures B2 à B6)

Vers 10 h 46 (t = 100 min), on procédait à l'injection à partir du point 13. La pression d'injection initiale atteignait 2600 kPa pour rapidement diminuer à des valeurs de 1900 à 2100 kPa. Durant cette période, les pressions ont été très peu affectées par les variations de la pression d'injection. Le débit, pour sa part, avec une valeur initiale de près de 30 l/min, s'est annulé en moins de 2 min. Comme le débit était devenu nul et que les pressions réagissaient très peu, la décision de changer le point d'injection s'imposait.

C'est pourquoi, on a repris les travaux au point 2 vers 10 h 56 (t = 110 min). La pression d'injection était alors d'environ 2500 kPa et affectait surtout les points situés près du point d'injection (1, 3, 5, 8 et 10), dont les pressions ont augmenté de 250 kPa. Le débit, lui, suivait une tendance similaire à celle observée au point d'injection précédent: une valeur initiale de près de 30 l/min qui diminue très rapidement et qui s'annule en moins de 10 min.

Vers 11 h 12 (t = 126 min), les mêmes phénomènes se sont répétés au nouveau point d'injection 4, sauf que le débit s'est annulé encore plus rapidement, soit en moins de 3 min.

Un autre changement de point d'injection était requis et il a eu lieu vers 11 h 22 (t = 136 min): c'est le point 20 qui a été choisi. Cette fois, la pression d'injection de 2500 kPa a eu des effets (augmentation de 100 kPa) pour une brève période (moins de 2 min) sur certains points limitrophes (18, 19 et 24). Le débit, toujours avec une valeur initiale élevée, a aussi diminué rapidement, mais il était plutôt irrégulier oscillant entre 0 et 4 l/min jusqu'à devenir complètement nul au bout d'environ 12 min. Ceci a provoqué le transfert du point d'injection au point 18 vers 11 h 37 (t = 151 min). La pression d'injection était alors de 2600 kPa pour ensuite se stabiliser autour de 2200 kPa. Quand l'injection a recommencé, on a pu observer que les pressions à certains points (17, 19, 22 et 24) ont subi une légère hausse de pression de 150 kPa. Par contre après environ 5 min, les pressions à tous les points sans exception s'annulaient ou devenaient constantes. Le débit, encore une fois, montrait une valeur initiale élevée de plus de 45 l/min pour très rapidement diminuer aux environs de 2 l/min pour ensuite s'annuler en quelques minutes. C'est ainsi que vers 11 h 52 (t = 166 min), on a mis fin à l'injection de la dalle 32. (Figures B2 à B6)

Tout au long de cette injection, on a utilisé seulement une recette de coulis à base de ciment microfin Spinor A12 avec un E/C volumique de 1,0 (E/C massique \approx 0,75) additionné de 1 % en extrait sec de superplastifiant à base de naphthaline étant donné que le débit s'est toujours maintenu à des niveaux très bas.

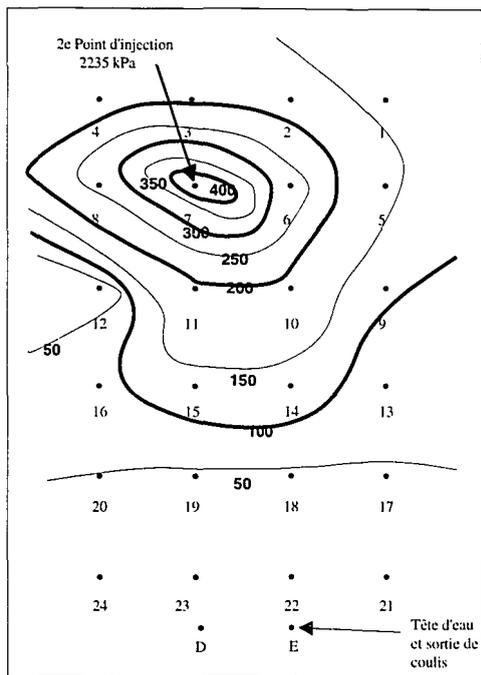


Figure 6.9 Courbe d'isopression (kPa) au début ($t = 34$ min) de l'injection de la dalle 32

Des courbes d'isopression, montrant la distribution des pressions au sein de la fissure, peuvent être tracées à tout moment durant l'injection, mais il a été choisi de seulement présenter celle peu après le changement de point d'injection au point 7 survenu vers 9 h 40 ($t = 34$ min). La figure 6.9 montre que la pression diminue rapidement au fur et à mesure que l'on s'éloigne du point d'injection. La géométrie de la fissure de même que la viscosité et la cohésion du produit d'injection ont une influence certaine sur ce comportement. Par ailleurs, il est clair en regardant les figures B3 à B6 qu'au début de l'injection, le comportement des courbes d'isopression est semblable à celui de la courbe d'isopénétration puisque la pression se bâtit au fur et à mesure que le coulis atteint les différents points. Par la suite, la pression à ces points suit les fluctuations de la pression au point d'injection jusqu'à ce que commence le colmatage de la fissure. À ce moment, la pression aux différents points

devient beaucoup moins sensible aux variations de pression pour éventuellement devenir constante ou nulle lorsque la fissure est colmatée.

Comme la pression d'injection du coulis dans la fissure crée une force agissant sur tout le système dalle-bâti, on devait examiner parallèlement les pressions aux différents points et les réactions aux cellules de charge; on s'aperçoit qu'ils suivent des tendances similaires. Ainsi, si les pressions augmentent, les tensions vont, elles aussi, augmenter et elles diminueront lorsque les pressions diminueront. Comme le montrent les figures B7 et B8, les cellules de charge ont réagi d'une manière semblable tout au long de l'injection: elles ont toutes très peu varié malgré quelques légères augmentations ponctuelles qui correspondaient avec l'application de la pression suite aux différents changements de point d'injection comme vers 9 h 40 ($t = 34$ min) où on assiste à une légère augmentation de la tension suite à l'application de la pression après un changement de point d'injection.

Parallèlement à l'observation des pressions, il est primordial de vérifier si l'ouverture de la fissure demeure stable. On s'intéresse donc aux variations de tension induites aux cellules de charge. Initialement, des forces de réaction passives d'environ 730 kN, soit au total 5800 kN, agissent sur le bâti. De plus, les déplacements lus durant cette injection étaient très petits et à la limite de résolution des capteurs de type LVDT. D'ailleurs, aucun déplacement explicable par les effets de l'injection n'a pu être observé, seulement deux déplacements soudains ont été enregistrés, soient au capteur 5 vers 10 h 53 ($t = 107$ min) et au capteur 12 vers 11 h 33 ($t = 147$ min) (Figures B9 et B10). Ces déplacements ne peuvent pas être justifiés puisqu'ils ont été observés durant des baisses généralisées de pression juste avant un transfert de point d'injection: on croit qu'ils ont été provoqués par inadvertance par un des intervenants lors du transfert de point d'injection.

Carottage de la dalle

Les résultats démontrent que la décompression de la dalle n'a pas affecté l'adhérence outre mesure, car la plupart des carottes retirées étaient et sont demeurées intactes au niveau de la fissure. Le carottage permettait aussi de vérifier la qualité de l'injection, la propagation du coulis et l'ouverture de la fissure injectée. Les différentes carottes (Figures B11 à B14) portent à croire que cette injection de coulis stable était réussie: le coulis s'est bien propagé pour réparer adéquatement la fissure fine d'une ouverture de 0,1 mm à 0,4 mm.

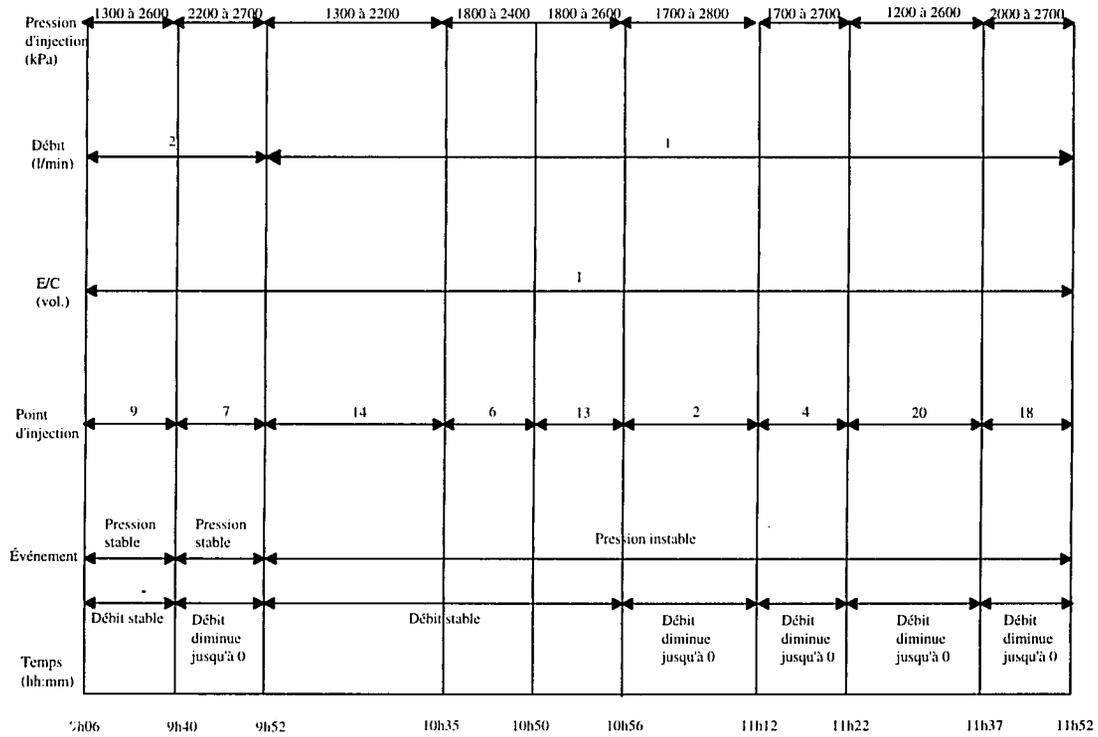


Figure 6.10 Résumé du déroulement de l'injection de la dalle 32

6.3 Dalle 33

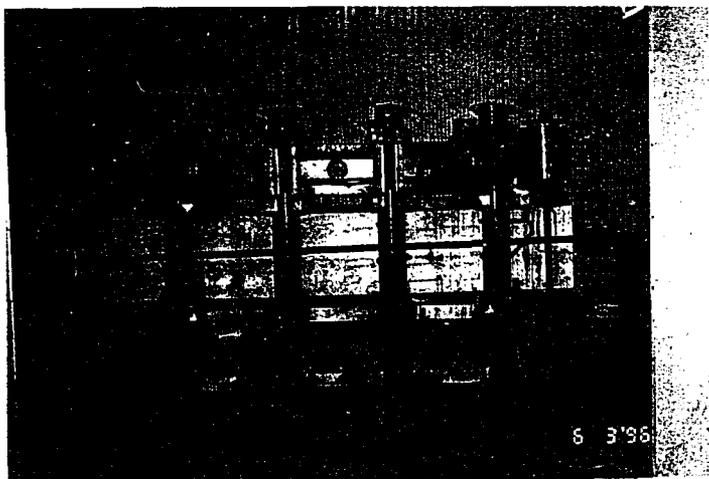


Figure 6.11 Dalle 33 dans le bâti métallique

De son côté, la dalle en béton no 33 a été injectée au Laboratoire Béton de la VPTI (Hydro-Québec) le 3 avril 1996. Elle avait été fabriquée le 16 juin 1992 et fissurée le 28 mars 1996. La figure 6.11 montre la dalle 33 placée dans le bâti où l'on peut voir deux systèmes différents de précontraintes latérales pour colmater des fissures indésirables. La fissure entre les tiges filetées 3 et 6 a pu être colmatée, mais celle à l'extrémité du bâti i.-e. entre les tiges 1 et 8 n'a pu qu'être partiellement colmatée, ce qui aura une légère influence sur les résultats des travaux puisque la dalle est ouverte à deux endroits au lieu d'un seul comme c'était le cas pour les deux injections précédentes.

De plus, quelques jours avant d'injecter la dalle, il a été décidé de procéder à un essai d'eau instrumenté. D'ailleurs, toutes les courbes nécessaires à l'analyse des résultats de l'essai d'eau et de ceux de l'injection sont présentées à l'annexe C.

Essai d'eau

L'essai d'eau a eu lieu le 1^{er} avril 1996, deux jours avant l'injection comme telle. Il a permis de vérifier et tester le fonctionnement du nouvel équipement, c'est-à-dire l'unité comprenant le malaxeur centrifuge, l'agitateur et la pompe à piston. Cet essai rend aussi possible la comparaison des comportements d'un fluide Newtonien, l'eau et d'un fluide cohésif Binghamien, le coulis de ciment.

Le premier phénomène d'intérêt que l'on observe est qu'une faible pression est nécessaire (environ 700 kPa) pour obtenir un débit d'absorption autour de 10 l/min (Figure C2) alors qu'habituellement pour des coulis des pressions de 2400 kPa engendrent des débits de l'ordre de 4 à 5 l/min.

On remarque aussi aux figures C3 à C6 que toutes les pressions aux différents points réagissent immédiatement et tous de la même manière à l'application et aux fluctuations de la pression du point d'injection, soit le point 7. On y voit que la perte de charge n'est pas très significative et qu'elle est plus importante à mesure que l'on s'éloigne du point d'injection et que l'on approche de la tête d'eau, située à proximité des points 22 et 23.

Le fait que les réactions aux cellules de charge réagissent aussi immédiatement à l'application et aux fluctuations de la pression d'injection et que toutes les cellules observent sensiblement le même comportement, quelque soit leur position par rapport au point d'injection est intéressant. (Figure C7 et C8) Ce phénomène est certainement lié à la faible résistance qu'offre l'eau durant la pénétration. Par contre, il est étonnant de constater que l'amplitude de la variation de la tension des cellules est plutôt faible à seulement quelques 5 kN. Mais cette faible amplitude est trompeuse: en effet un simple calcul, où on assume une distribution uniforme de 200 kPa sur toute la surface de la dalle, soit environ 3 m², démontre que la force totale ainsi créée est de 600 kN. En assumant que cette force est transférée uniformément dans les 8 tiges, cela supposerait une augmentation de plus de 75 kN par cellule. On peut conclure que la précontrainte du banc d'essai joue son rôle en limitant à 5 à 10 % la variation de la tension, ce qui a pour conséquence de réduire au minimum les déplacements. (Figures C9 et C10)

Injection

Pour l'injection de cette dalle, un coulis à base de ciment Portland type 30 additionné d'un superplastifiant à base de naphthaline (1 %) a été utilisé. La composition des mélanges testés et leurs caractéristiques rhéologiques (Tableau C1) ainsi que toutes les courbes nécessaires à l'analyse des résultats et toutes les photos concernant l'injection de la dalle 33 sont présentés à l'annexe C.

Vers 9 h 20 (3 avril 1996), on a effectué à l'aide de la pompe un essai d'eau au point 11 pour vérifier l'importance de la fuite au niveau de la lame du côté des points ABC, qui s'est avérée acceptable.

Vers 10 h 10 comme il était impossible de simuler adéquatement la tête d'eau au point E, il a été décidé de transférer la tête d'eau au point I.

Vers 10 h 32 ($t = 0$ min), l'injection a débuté au point 20 en utilisant le point I comme tête d'eau et un coulis de ciment Portland type 30 avec 1 % en extrait sec de superplastifiant à base de naphthaline. À ce moment, la pression initiale au point d'injection était d'environ 2200 kPa, mais elle a rapidement diminué à près de 500 kPa. Le débit avec une valeur initiale de près de 5 l/min a aussi suivi cette tendance devenant même nul après environ 3 min. Ces phénomènes sont difficiles à expliquer et sont sûrement la conséquence d'un contrôle inadéquat de la nouvelle pompe. (Figures C11 à D15)

Par contre après un peu plus de 5 min soit vers 10 h 37 ($t = 5$ min), la pression à des valeurs variant de 450 à 1100 kPa et le débit oscillant entre 3 et 4 l/min ont commencé à se comporter d'une manière plus normale et on a pu observer des augmentations de pression aux autres points, résultat de la pression qui se bâtit suite à la fermeture de la valve quand le coulis les a atteints. La séquence de pénétration du coulis peut être visualisée à l'aide d'une courbe d'isopénétration (Figure 6.12), qui représente le temps nécessaire au coulis pour qu'il atteigne les différents points de la dalle. Elle permet d'évaluer l'intercommunication de la fissure. On peut donc constater que le coulis s'est propagé radialement à partir du point d'injection. La fissure était cependant plus fine au niveau des points 17, 18, 21 et 22 où un délai plus long a été observé bien qu'ils soient situés près du point d'injection.

Par ailleurs, des courbes d'isopression, montrant la distribution des pressions au sein de la fissure, peuvent être tracées à tout moment durant l'injection, mais il a été choisi de

seulement présenter celle peu après le début de l'injection vers 11 h 00 (t = 28 min) (Figure 6.13). Cette figure montre que la pression diminue rapidement au fur et à mesure que l'on s'éloigne du point d'injection. La géométrie de la fissure de même que la viscosité et la cohésion du produit d'injection ont une influence certaine sur ce comportement. Ainsi, on s'aperçoit en examinant parallèlement les courbes d'isopression et d'isopénétration que la pression diminue beaucoup plus rapidement là où la fissure est plus fine.

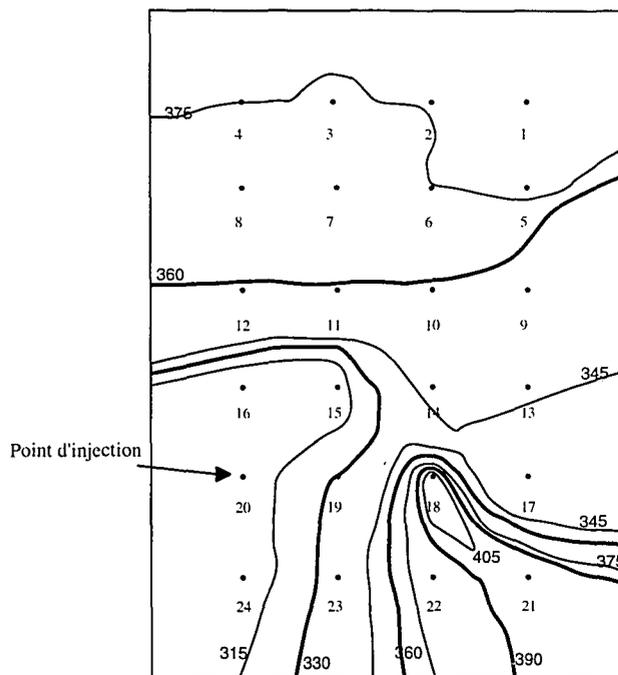


Figure 6.12 Courbe d'isopénétration (sec) de la dalle 33

C'est d'ailleurs à partir de ce moment que la pression au point d'injection s'est mise à augmenter graduellement, passant de 450 kPa à 1800 kPa avec une pointe à 2100 kPa vers 10 h 58 (t = 26 min) et une autre de 2450 kPa vers 11 h 05 (t = 33 min). Cette pointe de

pression au-delà de 2200 kPa est immédiatement suivie d'une chute de pression et d'une augmentation soudaine du débit, conséquence de l'action de la valve automatique de contrôle qui limite la pression d'injection à 2240 kPa. L'augmentation importante du débit attribuable à la valve de contrôle à des valeurs dépassant les 15 l/min est justifiable: en effet, la valve permet une réduction de la pression grâce à l'ouverture d'une valve qui laisse échapper un volume de coulis assez important en peu de temps. La pression aux autres points, malgré l'augmentation graduelle de la pression au point d'injection, n'a guère été influencée, si ce n'est une légère baisse graduelle, à des valeurs se situant entre 150 et 250 kPa. Durant ce laps de temps, le débit d'injection a suivi une tendance inverse à celle de la pression d'injection, il est graduellement devenu nul suite après avoir montré une valeur initiale de près de 4,5 l/min. (Figures C11 à C15)

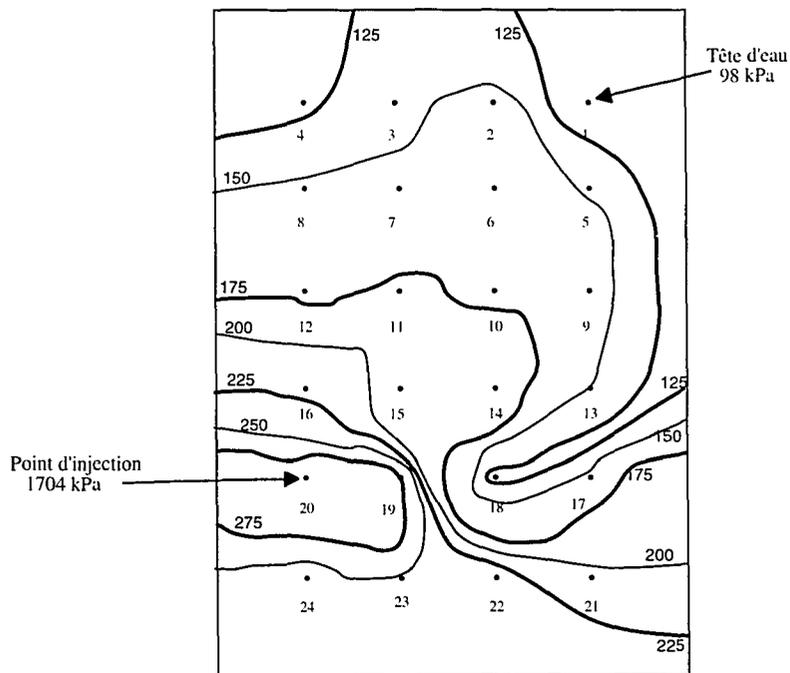


Figure 6.13 Courbe d'isopression (kPa) à 11 h 00 (t = 28 min) de l'injection de la dalle 33

C'est la raison qui explique le changement de point d'injection qui a eu lieu vers 11 h 15 (t = 43 min). L'injection est ensuite répartie au point 14 et cette fois la pression et le débit ont affiché des comportements semblables. En effet, il est clair que, sur la période de 11 h 22 (t = 50 min) à 11 h 42 (t = 70 min), ces paramètres vont augmenter et diminuer en même temps. Durant cette période, la pression est passée de 2300 à environ 1000 kPa pour se stabiliser aux environs de 2000 kPa. Le débit, pour sa part, a varié de 5 à 0 l/min avec une période plus stable entre 1 et 3 l/min. La pression aux autres points plutôt uniforme aux alentours de 200 à 250 kPa était sensible aux variations de la pression d'injection immédiatement après le changement de point, mais cette sensibilité s'est quelque peu atténuée lorsque le débit a commencé à diminuer: tous deux signes du colmatage progressif de la fissure. C'est aussi vers 11 h 22 (t = 50 min) que l'on remarque les effets de la thixotropie du coulis. En effet, ce coulis, s'il n'est pas soumis à une pression suffisante, va décanter très vite. C'est entre autres pourquoi la pression d'injection au point 14 semble diminuer si on se réfère à l'annexe C figures C2 et C3, qui montre la pression aux différents points de la dalle. Par contre, en examinant la figure C1 de l'Annexe C montrant la pression dans le boyau d'injection, on se rend compte que la pression va plutôt en augmentant. Ceci laisse présager que le coulis s'est déposé sur le capteur de pression. Ce phénomène va affecter les données des pressions aux différents recueillies surtout vers la fin d'une séquence d'injection à un point d'injection donné, soit vers 11 h 27 (t = 55 min) pour le point 14 et vers 11 h 49 (t = 77 min) pour le point 21. (Figures C11 à C15)

Vers 11 h 45 (t = 73 min), après que le débit s'est annulé malgré une pression élevée, il a été décidé de transférer le point d'injection au point 21. Durant les quelques minutes qui ont suivi (environ 15 min), la pression et le débit à ce point étaient très instables, le débit variant de 0 à des valeurs de près de 20 l/min. Ceci est sans doute lié à l'utilisation de la valve de contrôle de surpression au point d'injection. C'est pourquoi on peut relier les débits importants aux baisses soudaines de pression au point d'injection. Ces indices et la très faible sensibilité des autres points aux fluctuations de la pression portent à croire que ce point 21 était déjà colmaté.

Il fallait donc changer de point d'injection et c'est vers 11 h 5 (t = 87 min) qu'il est survenu et le point 11 a été choisi à cet effet. C'est aussi à ce moment qu'on a décidé de modifier la recette en passant d'un rapport E/C volumique de 0,7 (E/C massique = 0,63) à 0,6 (E/C massique = 0,5). Ceci avait été rendu nécessaire puisque des fuites importantes avaient été observées.

À partir de ce moment et pour le reste de l'injection, la pression oscillant entre 1400 et 2300 kPa avec une baisse momentanée à environ 750 kPa vers 12 h 14 ($t = 102$ min) et le débit variant de 0 à 5 l/min a été très instable. Malgré cette instabilité de la pression au point d'injection, la pression aux différents points s'est montrée très peu affectée et est demeurée très basse à moins de 150 kPa: le colmatage de la fissure en était sans doute la cause. Par contre, on remarque une tendance évidente: tout au long de cette période, la pression d'injection augmente jusqu'aux alentours de 2300 kPa pour redescendre subitement. Ce comportement montre que la valve de contrôle a joué son rôle en limitant la pression. Le débit d'injection, qui diminue graduellement après qu'une valeur initiale de 4,5 l/min a été observée, a encore réagi à l'inverse de la pression en augmentant rapidement suites aux baisses subites de pression. Finalement, un débit très faible correspondant à la perte observée à la fissure ouverte au niveau de la lame du côté des points ABC ainsi qu'une faible sensibilité des autres points aux fluctuations de pression laissaient croire que la majeure de la fissure était colmatée et que le coulis suivait un trajet préférentiel pour s'écouler de la fissure; c'est pour cette raison que l'on a décidé de mettre fin à l'injection de cette dalle vers 12 h 38 ($t = 126$ min). (Figures C11 à C15)

Lors d'une injection, il importe d'examiner le comportement des forces de réaction aux cellules de charge. On remarque aux figures C16 et C17, qui montrent la variation des forces de réaction, que tout au long de l'injection celles-ci ne varient pas beaucoup avec une amplitude maximale de moins de 10 kN. Cependant, sachant que le bâti a été précontraint à près de 6400 kN, soit environ 800 kN par tige filetée, dans le but de restreindre au minimum les amplitudes des variations de la tension de ces tiges et des déplacements qui en résulteraient, on doit se rappeler que cette variation durant l'essai d'eau elle ne représentait que 5 à 10 % de la force réelle appliquée. On doit donc s'attendre à des forces beaucoup plus importantes durant une injection où les forces de réaction ne sont pas nécessairement atténuées de la sorte. Évidemment, la structure, par son poids propre, sa géométrie structurale ou par d'autres moyens (ancrages, précontrainte, etc.) va pouvoir contrecarrer ces effets dans la plupart des cas, mais il faut tout de même réaliser que les forces créées durant les injections en chantier sont beaucoup plus grandes que ce que l'on mesure en laboratoire.

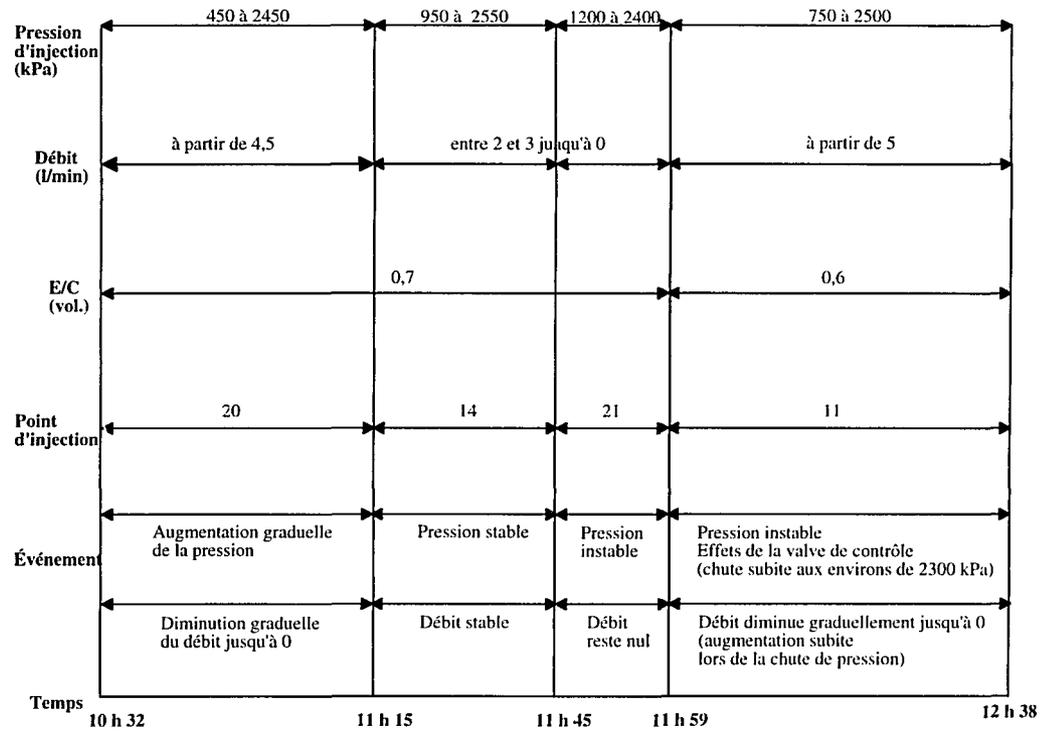


Figure 6.14 Résumé du déroulement de l'injection de la dalle 33

Si on regarde la même figure, on y voit que toutes les cellules de charge vont varier d'une manière semblable, et ce quelque soit leur emplacement par rapport au point d'injection. Comme tous les autres paramètres sont gardés constants, seuls le débit, la pression et le changement de rapport E/C peuvent influencer le comportement du coulis. Afin de déterminer les diverses influences de ces paramètres, il est intéressant d'analyser les trois graphiques suivants qui comparent leur évolution respective en fonction du temps: la pression et le débit (Figure C11), la réaction aux cellules de charge et la pression (Figure C18) ainsi que la réaction aux cellules de charge et le débit (Figure C19).

Le premier graphique (Figure C11) montre que, comme on s'y attend dans la plupart des cas, l'injection débute avec un certain débit à une pression donnée et par la suite on remarque qu'à mesure que l'absorption diminue alors que la pression augmente jusqu'à ce que le débit devienne nul quand la pression de refus est atteinte suite à un colmatage de cette portion de la fissure. Le second (Figure C18), illustrant la pression et les réactions, permet de constater que la pression influence surtout les réactions immédiatement après que l'injection débute ou reprenne suite à un changement de point d'injection. Ensuite, les cellules deviennent moins sensibles à l'action de la pression d'injection: on remarque même qu'après un certains temps, les réactions vont diminuer malgré une augmentation de la pression. Ce phénomène est certainement lié au colmatage progressif de la fissure. En effet, une fois que le coulis a rempli celle-ci sur son rayon maximal d'action, sa thixotropie peut le rendre plus pâteux, ce qui atténue ses capacités à transmettre la pression. Le troisième graphique (Figure C19), où sont illustrés le débit et les réactions aux cellules de charge, permet de constater que le débit influence aussi les réactions, mais à l'inverse de la pression. Ainsi au début, le débit n'affecte pas vraiment les réactions: les charges restent stables ou augmentent malgré une baisse de débit. Cependant après un certain laps de temps, qui correspond à celui où la pression perd de son influence, les cellules augmentent ou diminuent comme le fait le débit. Ceci pourrait être explicable par l'action du coulis poussant sur la pâte de coulis, qui, sans transmettre la pression, crée des forces de réaction au niveau de la fissure. C'est sans doute pour cette raison que la pression à un certain moment se met à augmenter puisque la force requise pour déplacer la pâte est plus grande que celle requise pour déplacer le coulis. C'est pourquoi durant une véritable injection en chantier, on doit non seulement tenir compte de la pression, mais il est très important de surveiller aussi le débit pour éviter les risques de propagation des fissures.

Ces forces de réaction peuvent engendrer des déplacements. Ceux-ci sont limités au minimum par l'action du bâti, ce qui explique que durant cette injection, ils étaient très petits et à la limite de résolution des capteurs de type LVDT. D'ailleurs, seulement un déplacement explicable par les effets de l'injection a pu être observé au capteur 8 vers 10 h 42 (t = 101 min) (Figures C20 et C21). Celui-ci coïncide avec l'instant où la pression commence à se bâtir. Les autres déplacements ne peuvent pas être justifiés puisqu'ils ont été observés durant des baisses généralisées de pression juste avant un transfert de point d'injection: on croit qu'ils ont été provoqués par inadvertance par un des intervenants lors du transfert de point d'injection.

Carottage de la dalle

La qualité des différentes carottes, dont la plupart sont restées intactes (Figures C22 à C27), portent à croire que cette injection de coulis stable était réussie. On peut conclure que le coulis s'est bien propagé pour réparer adéquatement des fissures de 0,3 à 0,6 mm.

6.4 Conclusions et recommandations

Les injections en laboratoire des grandes dalles de béton pour simuler la réparation des fissures communicantes avec le réservoir des barrages de béton ont permis de faire ressortir de nombreuses observations intéressantes. On a en effet pu conclure que:

- la pénétration des coulis dépend essentiellement de leurs caractéristiques rhéologiques et de la morphologie de la fissure;
- la pression s'atténue très rapidement au fur et à mesure que l'on s'éloigne du trou d'injection;
- l'écoulement n'est pas uniformément radial, il suit plutôt un trajet préférentiel, i.-e. celui qui offre le moins de résistance;
- la pression crée des forces de soulèvement qui sont proportionnelles à la pression appliquée et qui suivent ses fluctuations;
- l'injection se déroule en deux étapes: l'écoulement et la sédimentation du coulis;
- le produit d'injection doit être choisi en fonction des caractéristiques du milieu à traiter (morphologie de la fissure, température, degré d'humidité, etc.)

- les époxyds montrent une bonne pénétrabilité dans les fissures fines, mais ils montrent des problèmes de prise et d'adhérence à basse température et en milieu humide;
- l'utilisation de coulis de ciment Portland ou microfin avec des propriétés qui se rapprochent de celles du béton et qui performent bien à basse température est recommandée pour réparer les barrages;
- la sélection de l'équipement et des instruments de mesure joue un rôle majeur pour assurer le succès de l'injection. Cette injection expérimentale a rendu possible l'expérimentation de plusieurs équipements d'injection et instruments de mesure, susceptibles d'être utilisés lors de futurs travaux in situ. Par exemple, l'utilisation d'un malaxeur centrifuge est suggérée pour obtenir des coulis uniformes et de bonne qualité. Les instruments de mesure devraient aussi être reliés à un système d'acquisition de données pour un meilleur contrôle des différents paramètres lors des injections;
- ces injections expérimentales ont rendu possible l'expérimentation de nouveaux équipements d'injection susceptibles d'être utilisés lors de futurs travaux in situ. La nouvelle pompe à piston et une valve de contrôle automatique ont bien performé et ont contribué au succès de l'injection;
- les diverses méthodes d'investigation non destructives peuvent aider à localiser la fissure à injecter ou à vérifier la qualité de l'injection résultante;
- comparer les différentes injections est un exercice difficile bien que sensiblement les mêmes procédures d'essais aient été respectées. En effet, la morphologie de la fissure et les caractéristiques rhéologiques du coulis influencent grandement les divers paramètres d'injection.

Les injections des dalles 31, 32 et 33 avec des coulis stables à base de ciment Portland ou de ciment microfin avec 1 % en extrait sec de superplastifiant à base de naphthaline ont fait ressortir plusieurs points intéressants. Lors des injections de ces dalles, des coulis stables de rapport E/C = 1,0 (E/C massique = 0,75) ou moins avec un superplastifiant ont été utilisés. Ce rapport eau-ciment est faible comparativement à ceux des coulis déjà utilisés pour l'injection des fissures plongeantes du barrage Daniel-Johnson, soit E/C = 5,0 (E/C massique = 3,75). Ces coulis possèdent des caractéristiques rhéologiques comparables aux coulis de rapports E/C

rappports E/C plus élevés (viscosité) en plus d'une meilleure stabilité et de meilleures caractéristiques mécaniques (résistance mécanique, temps de prise, etc.). Ces injections ont fait ressortir les points suivants:

- l'utilisation d'un superplastifiant dans les mélanges assure une bonne dispersion des grains de ciment et diminue la viscosité du coulis, ce qui augmente leur pouvoir de pénétration et rend même possible l'injection de fissures fines (0,1 à 0,5 mm) par un coulis de ciment Portland type 10;
- les coulis stables ont consolidé adéquatement les dalles durant les injections de fissures horizontales: leur propagation était bonne et leur adhérence excellente malgré que les fissures étaient fines, la plupart des carottes étant restées intactes au niveau de la fissure.
- au cours de chacune des injections, aucun blocage ne s'est produit autant dans les boyaux que les divers équipements ou instruments;
- quand on injecte le coulis, la pression s'atténue plus rapidement que durant une injection d'eau plus on s'éloigne du point d'injection; et si la fissure est très fine et le coulis stable, la pression du coulis va s'atténuer encore plus rapidement. Cependant l'ouverture de la fissure affecte très peu le comportement de la pression aux différents points durant l'essai d'eau;
- il est claire, comme c'est le cas pour la dalle 33, que le débit d'absorption est moins élevé que ceux observés au cours des autres injections étant donné que le coulis était plus visqueux et son seuil de cisaillement plus élevé;
- même si la pression s'atténue très rapidement plus on s'éloigne du point d'injection, on doit non seulement contrôler la pression, mais il est très important de surveiller aussi le débit pour éviter les risques de propagation des fissures;
- la finesse de la fissure ralentit et limite la propagation du coulis, il a donc fallu transférer le point d'injection pour colmater toute la fissure plus souvent que durant les injections antérieures de coulis instables;
- durant l'injection de la dalle 33, le coulis de ciment type 30 était très thixotropique: il décaitait très vite quand il n'était pas soumis à une pression ou à

un débit suffisant. On se doit donc d'être vigilant pour éviter le blocage des boyaux. Il faut aussi éviter d'arrêter et de repartir inutilement une injection à un point donné puisqu'il pourrait arriver que la pression appliquée soit insuffisante pour engendrer la propagation du coulis, ce qui résulterait en un colmatage prématuré et incomplet de la fissure traitée:

- dans le cas des trois injections, le temps d'injection a été réduit: pour la dalle 33 après à peine 2 heures seulement, la dalle était complètement injectée malgré une ouverture importante de la fissure (0,6 mm):

Cependant, quelques ajustements pourraient être apporté à ces essais en laboratoire. Ces changements, quoi que mineurs, en plus de faciliter grandement dans certains cas la tâche pour la préparation, les injections permettraient de comparer plus adéquatement les différentes injections entre elles et même de faire ressortir des points nouveaux. Il serait entre autres possibles de:

- réévaluer la conception des dalles pour les rendre plus rigide et ainsi éviter qu'elles ne se fracturent à des endroits imprévus;
- injecter des fissures d'ouverture semblable pour être en mesure de mieux comparer les produits et les méthodes;
- effectuer des injections sans la précontrainte du banc pour évaluer plus précisément l'influence de la pression et du débit sur les forces de réaction et les déplacements durant les différentes phases de l'injection;
- injecter des coulis très épais à partir d'une extrémité pour suivre leur propagation et la distribution des pressions;
- alors que l'injection a lieu à une des extrémités, appliquer la tête d'eau à une série de points centraux simulant ainsi une fissure ouverte sur une plus grande distance afin de vérifier les effets de la tête d'eau sur la propagation et la distribution des pressions.

7.0 Conclusions et recommandations générales

Sachant de prime abord que toutes les structures de béton vont éventuellement souffrir d'une forme ou d'une autre de détérioration, il importe de soit les entretenir ou de les réparer pour qu'elles soient aptes à remplir leurs rôles. De cette manière, afin de réaliser des travaux d'entretien ou de réparation de qualité et durable, il est primordial de déterminer la ou les cause(s) du problème. C'est pourquoi quand vient le temps de remédier à des problèmes de fissuration, on doit d'abord inspecter l'ouvrage non seulement pour déterminer le type de fissure et sa morphologie, mais aussi pour savoir quelles sont les conditions d'exposition de cette fissure et de l'ouvrage. Ceci est absolument nécessaire pour effectuer un choix éclairé de la méthode à suivre et des produits de réparation à utiliser pour obtenir les meilleurs résultats possibles.

C'est d'autant plus vrai si l'on décide de recourir à l'injection pour réparer un ouvrage de béton. En effet, chaque chantier d'injection est particulier et il faut adapter l'approche aux conditions de chacun puisqu'aucune procédure n'est d'usage général. Par contre, décider quels méthodes, procédures, équipements ou produits sont les plus appropriés devient très difficile dans certaines situations surtout que l'injection constitue une technique où il est très difficile, même pratiquement impossible, par des moyens directs de voir la fissure à traiter ou de juger de la qualité des travaux. C'est sûrement la raison qui explique pourquoi il existe plusieurs visions et par le fait même, plusieurs approches. De plus, nombreux sont ceux qui suggèrent que la maîtrise de cette technique passe autant par une solide expérience que par de vastes connaissances.

Les différents essais d'injection réalisés à l'Hydro-Québec ont permis de mieux comprendre le comportement du coulis d'injection à l'intérieur d'une fissure. L'analyse des résultats des travaux d'injection a conduit à des conclusions pratiques concernant la distribution des pressions et la pénétration du coulis à l'intérieur d'une fissure durant l'injection: la morphologie de la fissure et les caractéristiques rhéologiques des coulis influencent la distribution des pressions au sein de la fissure et le coulis suit un trajet préférentiel, celui offrant le moins de résistance.

Ces études ont aussi démontré dans le cas des injections de structures hydrauliques de béton soumises à des conditions climatiques rigoureuses que les coulis chimiques, époxydes ou polyuréthanes, éprouvent des problèmes de prise et d'adhérence alors que les coulis à base de ciment, Portland ou microfin, quant à eux, forment très bien avec des propriétés

semblables à celles du béton et ce, même s'ils sont injectés à basse température. Les coulis de ciment microfin, qui montre une pénétrabilité accrue grâce à leur fine granulométrie, sont particulièrement recommandés pour l'injection des microfissures.

De leur côté, les plus récentes simulations d'injection en laboratoire contenues dans ce mémoire semblent démontrer que l'injection de coulis stables donne des résultats supérieurs à ceux des injections expérimentales antérieures autant celles menées dans le cadre du même projet que celles menées par d'autres organismes où ce sont surtout des coulis instables qui avaient été utilisés. Il a en effet été possible d'injecter de grandes dalles et consolider des fissures horizontales de traction de 0,1 à 0,6 mm avec ces coulis stables à base de ciment alors que c'est un manque flagrant d'adhérence qui caractérisait toutes les autres injections en laboratoire.

Ainsi pour obtenir ces coulis stables à base de ciment, on doit s'assurer d'utiliser le rapport E/C le plus faible possible selon le produit injecté pour minimiser la quantité d'eau injectée et ajouter du superplastifiant ce qui résulte en un coulis de caractéristiques rhéologiques semblables à celles des coulis de rapport E/C plus élevé tout en gardant de meilleurs caractéristiques mécaniques. Il est aussi recommandé de prendre soin de tester les produits ou les adjuvants afin de s'assurer qu'ils se comportent bien comme on s'y attendait et qu'ils soient compatibles entre eux.

D'ailleurs, l'utilisation d'un coulis stable, ayant des caractéristiques rhéologiques contrôlées, diminue les risques d'une fracturation hydraulique lors de l'injection d'une fissure fermée. C'est pourquoi il peut être utile de suivre la méthode d'injection du G.I.N. Cette méthode en plus de suggérer l'utilisation de coulis stables en tout temps exige que l'on surveille attentivement l'évolution en temps réel de la pression d'injection et du volume total de coulis injecté pour ainsi limiter l'énergie injectée. Injecter selon le G.I.N. est particulièrement souhaitable pour les injections de fissures fermées où il faut être très prudent: i. e. où il faut éviter tout risque de déplacement ou de surpressions qui pourraient aggraver le problème existant de fissuration. Par contre, il est très difficile d'adapter cette méthode aux fissures ouvertes étant donné que, dans la majorité de ces injections, il est presque impossible de déterminer quelle est la proportion de coulis reste vraiment dans la fissure. Dans ces cas, il est préférable d'injecter selon la méthode classique modifiée, qui allie les procédures de la méthode classique, mais où des coulis stables sont utilisés. Cette méthode d'injection demande comme le G.I.N. le suivi en temps réel à l'aide d'un système d'acquisition de données pour suivre les paramètres d'injection si l'on injecte dans des conditions délicates.

Néanmoins, comme aucune méthode ou procédure ne peut être généralisée à tous les chantiers, il faut dans certains cas, où l'intégrité structurale pourrait être compromise par l'injection, recourir à des analyses structurales poussées pour déterminer des paramètres d'injection efficaces et sécuritaires.

Par contre, avant de procéder à une injection, il est toujours préférable d'effectuer des essais d'eau exploratoires et préliminaires. Ces essais sont très pratiques et permettent d'avoir une idée du comportement de l'injection et de détecter des troubles potentiels. Cependant, ces essais doivent être effectués avec prudence parce que l'eau subit au sein de la fissure des pertes de charge beaucoup moins importantes que les coulis et cela peut créer des forces de soulèvement très grandes et propager la fissure traitée.

Les équipements et les instruments jouent un rôle de premier plan dans la réussite d'une injection. Pour obtenir des coulis de haute qualité, on suggère de se servir des malaxeurs centrifuges. Ceux-ci avec une énergie de malaxage plus grande permettent de malaxer des coulis plus uniformes avec des particules mieux lubrifiées pour une meilleure pénétrabilité. L'utilisation d'un réseau d'instruments reliés à un système d'acquisition de données est aussi très avantageux pour suivre et analyser les divers paramètres durant le déroulement de l'injection de même que pour gérer les instruments de contrôle automatique, comme la valve de contrôle de la surpression ou les différentes alarmes en cas d'incident. Évidemment tous ces instruments sont utilisés dans des projets qui en valent la peine économiquement et techniquement.

8.0 Bibliographie

1. ACI COMMITTEE 224 (1984)
Causes, Evaluation and Repair of Cracks in Concrete, ACI Journal Mai-Juin 1984, É.U., pp. 211-230
2. ASSOCIATION CANADIENNE DE CIMENT PORTLAND (1984)
Design and Control of Concrete Mixtures, Ottawa, Ont. Canada
3. BALLIVY, G., SALEH, K., BOUDAYA, I. (1990)
Injection de la dalle 20 par le coulis de ciment type 50, rapport GR-92-05-4, Université de Sherbrooke
4. BALLIVY, G., SALEH, K., MNIF T., NADEAU, M. (1990)
Injection de la dalle 3 avec la résine époxyde, Rapport GR-90-5-4, Université de Sherbrooke et IREQ, Hydro-Québec, .
5. BALLIVY, G., SALEH, K., MNIF, T. (1992 A)
Injection de la dalle 12 par le Robar, rapport GR-92-05-2, Université de Sherbrooke. 1992.
6. BALLIVY, G., SALEH, K., MNIF, T. (1992 B)
Injection de la dalle 23 par la résine Mulco 68, rapport GR-92-09-2, Université de Sherbrooke
7. BOGGS H.L. (1985)
Cracking in Concrete Dams USBR Histories, Q57 R10, Commission Internationale des Grands Barrages, Quinzième Congrès des Grands Barrages, Lausanne, Suisse.
8. BOUDAYA I. (1993)
Répartition de la pression d'injection d'un coulis de ciment dans une fissure, Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Qc, Canada
9. BOUJA A. (1995)
Contribution à l'étude de l'injection d'un coulis de ciment en milieu fissuré, Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Qc, Canada
10. BRUCE D.A., GALLAVRESI F. (1988)
The MPSP system: A new method of grouting difficult rock formations, ASCE Geotechnical Special Publication No. 14 Geotechnical Aspects of Karst Terrains, pp. 97-114
11. CARRERÉ A., FERRIER H., LAZARINI P., LEBRETON A., MARCHESINI P., MEYERFELD D., RENIER D.(1985)
Fissurations constatées sur les barrages en béton autres causes que le gonflement, Q57 R36, Commission Internationale des Grands Barrages, Quinzième Congrès des Grands Barrages, Lausanne, Suisse.
12. CHARLEZ P.A. (1991)
Rock Mechanics volume 1 Theoretical Fundamentals, Éditions Technip, Paris, France, pp. 245-247
13. COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON (1992)
Durable Concrete Structures: Design Guide, Thomas Telford, Londres, G.-B.
14. EMMONDS P.H. (1994)
Concrete Repair and Maintenance Illustrated, Means, Kingston, Ma. É.U.

15. EWERT F.-K. (1996 A)
THE GIN PRINCIPLE: a helpful method for rock grouting? Part 1, International Water Power and Dam Construction, février, pp. 17-23
16. EWERT F.-K. (1996 B)
THE GIN PRINCIPLE: a helpful method for rock grouting? Part 2, International Water Power and Dam Construction, avril, pp. 36-40
17. EWERT F.-K. (1985)
Rock Grouting with Emphasis on Dam Sites, Springer-Verlag, Berlin, Allemagne.
18. EWERT F.-K. (1992)
Evaluation and interpretation of water pressure tests, Proc. Conf. Institution of Civil Engineers, Grouting in the Ground, Thomas Telford, Londre, G.B., pp. 141-162,
19. GROUPE DE TRAVAIL SUR L'INJECTION (1991)
Rapport de synthèse 1986-1990, sous la coordination de la région Manicouagan, Hydro-Québec, Rapport GR-91-7-1
20. GROUPE DE TRAVAIL SUR L'INJECTION (1992)
Simulation d'injection des microfissures dans les barrages: Procédure d'injection dans une dalle de béton, Deuxième Colloque sur la consolidation et la réparation des infrastructures par les techniques d'injection, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, pp.195-214
21. HASSANI F.P., MOMAYEZ M., GUÈVREMONT P., SALEH K., TREMBLAY S., (1996)
Revue de la littérature: méthodes d'inspections non destructives pour la détection des fissures dans le béton, Rapport VPTI, IREQ-96-111, Présenté à Hydro-Québec (DMESB et Région Manicouagan)
22. HOULSBY A.C. (1990)
Construction and Design of Cement Grouting: A Guide to Grouting in Rock Foundations, John Wiley and Sons, Inc., New York
23. HOULSBY A.C., (1985)
Cement Grouting: Water Minimising Practices, Issues in Dam Grouting, ASCE, edited by W.H. Baker, Denver, Colorado, É.U., pp. 34-75
24. KAROL R.H. (1990)
Chemical Grouting, 2^e édition, Marcel Dekker, É.U.
25. LOMBARDI G. (1985)
The Role of Cohesion in Cement Grouting of Rock, Q.58 R13, Commission Internationale des Grands Barrages, Quinzième Congrès des Grands Barrages, Lausanne, Suisse.
26. LOMBARDI G., DEERE D. (1993)
Grouting Design and Control Using the GIN Principle, Water Power and Dam Construction, juin , pp 15-22
27. MAILVAGANAM N.P. (1991)
Repair and Protection of Concrete Structures, C.R.C. Press, Ottawa, Ont., Canada

28. MNIF T. (1996)
Prédiction de l'injectabilité des coulis de ciment dans des milieux fissurés, Document de l'examen prédoctoral, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Qc. Canada
29. NADEAU, M. (1990)
Rapport d'injection de la dalle 15 avec époxyde Mulco M80, IREQ, Hydro-Québec
30. SALEH K.(1993 A)
Guide technique pour l'injection des fissure plongeantes du barrage Daniel-Johnson, Rapport VPTI, IREQ-93-287, Présenté à Hydro-Québec (Région Manicouagan)
31. SALEH K.(1993 A)
Rapport de synthèse et de recommandation sur les méthodes, produits et équipements d'injection, Rapport VPTI, IREQ-93-211, Présenté à Hydro-Québec (Région Manicouagan)
32. SALEH K., DUMONT C. (1994)
Fissuration et travaux d'injection de la voûte 5-6 du barrage Daniel-Johnson, Rapport VPTI, IREQ-94-222, Présenté à Hydro-Québec (Région Manicouagan)
33. SALEH K., DUMONT C. (1995)
Étude sur les coulis d'injection à base de ciment microfin, Rapport VPTI, IREQ-95-279, Présenté à Hydro-Québec (Région Manicouagan)
34. SALEH K., LAPOINTE R. (1996)
Étude de trois méthodes d'injection pour le barrage Daniel-Johnson: classique, classique modifiée et G.I.N., Rapport VPTI, IREQ-96-116, Présenté à Hydro-Québec (DMESB et Région Manicouagan)
35. SALEH K., MIRZA J., MNIF T. (1995)
Injection de la dalle no 30 par le coulis de ciment Portland type 10, Rapport VPTI, IREQ-95-209, Présenté à Hydro-Québec (DMESB et Région Manicouagan)
36. SALEH K., TREMBLAY S., LACASSE J.-P., LAPOINTE R. (1996 A)
Injection de la dalle de béton no 31 par un coulis stable à base de ciment Portland type 10, Rapport VPTI, IREQ-96-115, Présenté à Hydro-Québec (DMESB et Région Manicouagan)
37. SALEH K., TREMBLAY S., LACASSE J.-P., LAPOINTE R. (1996 B)
Injection de la dalle de béton no 32 par un coulis stable à base de ciment microfin Spinor A12, Rapport VPTI, IREQ-96-120, Présenté à Hydro-Québec (DMESB et Région Manicouagan)
38. SALEH K., TREMBLAY S., LACASSE J.-P., LAPOINTE R. (1996 C)
Injection de la dalle de béton no 33 par un coulis stable à base de ciment Portland type 30, Rapport VPTI, IREQ-96-250, Présenté à Hydro-Québec (DMESB et Région Manicouagan)
39. SALEH K., TREMBLAY S., LAPOINTE R. (1995)
Simulation en laboratoire de l'injection d'une fissure de barrage Rapport VPTI, IREQ-95-309, Colloque 1995 MESB-VPTI Fiabilité, surveillance et maintenance des ouvrages de génie civil, Varennes, Qc, Canada, pp. 140-161

40. TURCOTTE L., SAVARD B., LOMBARDI G., JOBIN H. (1994)
The Use of Stable Grout and G.I.N. Technique in Grouting for Dam Rehabilitation, Dam Safety
41. WEAVER K. (1991)
Dam Foundation Grouting, ASCE, New York. É.U.
42. WEBAC (1996)
Product Catalog, WEBAC America Corp., Costa Mesa, CA., É.U.

Annexe A

Résultats de l'injection de la dalle 31

Tableau A1 Caractéristiques rhéologiques du coulis stable à base de ciment Portland type 10
Par Claude Dumont

Mélange	Unités	Rapport E/C Volumique			
		1	0.75	0.6	0.5
		Rapport E/C Massique			
		0.75	0.55	0.45	0.38
Masse volumique	Kg/m3	1627	1726	1866	1983
Écoulement	sec	38	43	50	68
Temps de prise	Hrs	10	8	6	5
Viscosité	cP	10.2	13.1	26.4	57.5
Cohésion	Pa	1.15	1.4	1.7	1.95
Ressuage	%	50.5	70	94.4	95.1

Calculs effectués sur la base d'une masse volumique de 1350 kg/m3 pour un ciment non compacté.
 (Valeur vérifiée en laboratoire sur un volume de ciment vibré mais non compacté mécaniquement)

- Capteurs de pression
- Capteurs de déplacement
- Cellules de charge
- ⓑ Carottes

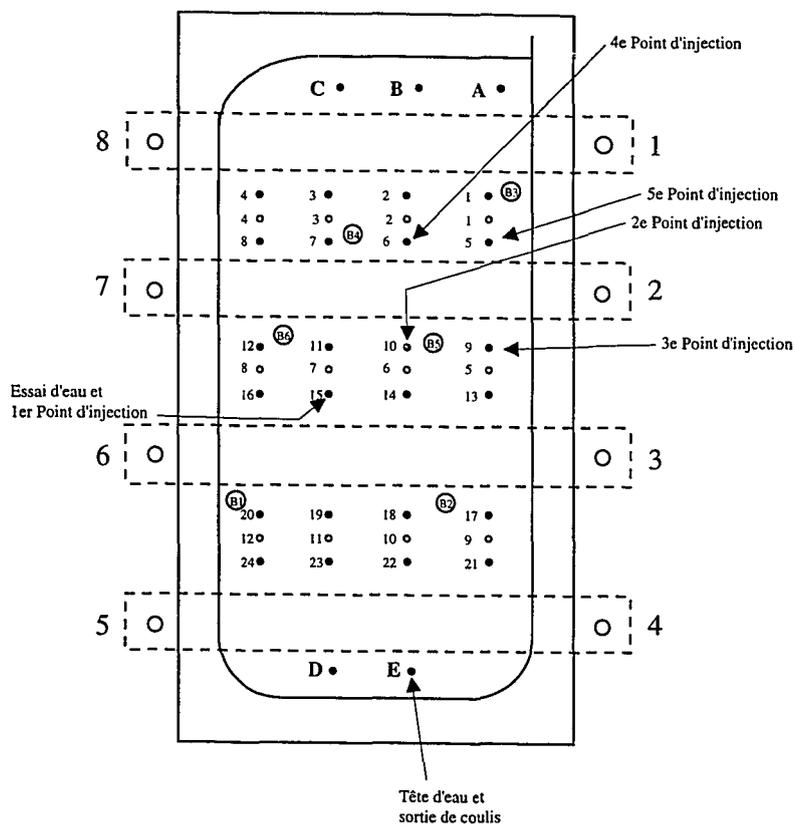


Figure A1 Configuration de la dalle 31

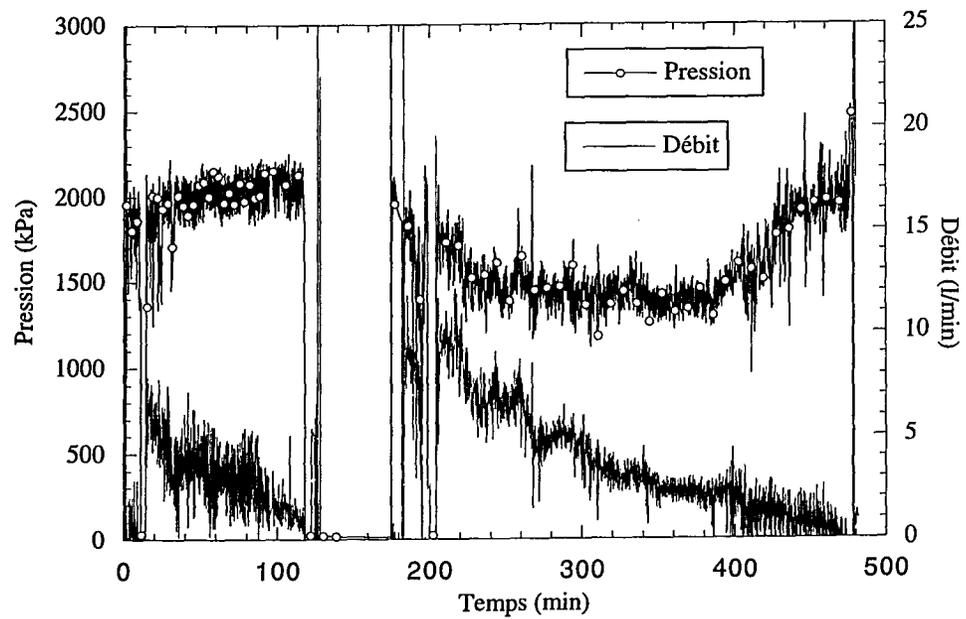


Figure A2 Débit et pression au point d'injection

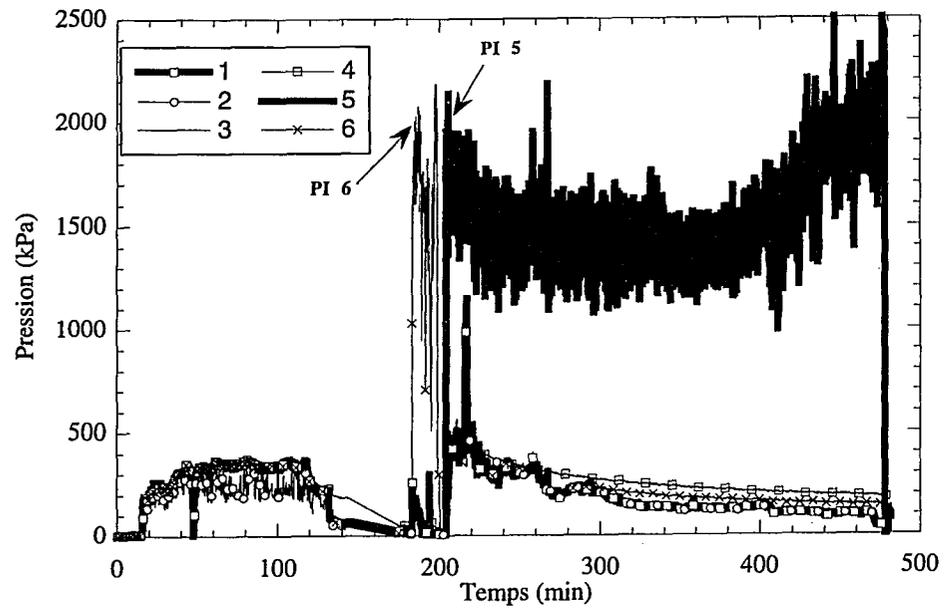


Figure A3 Variation de la pression durant l'injection (capteurs 1 à 6)

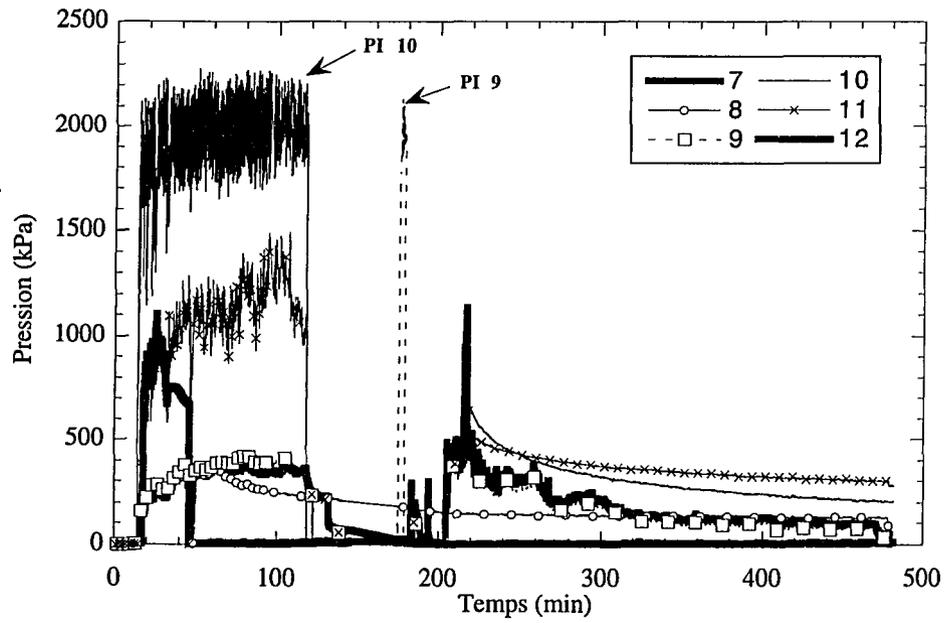


Figure A4 Variation de la pression durant l'injection (capteurs 7 à 12)

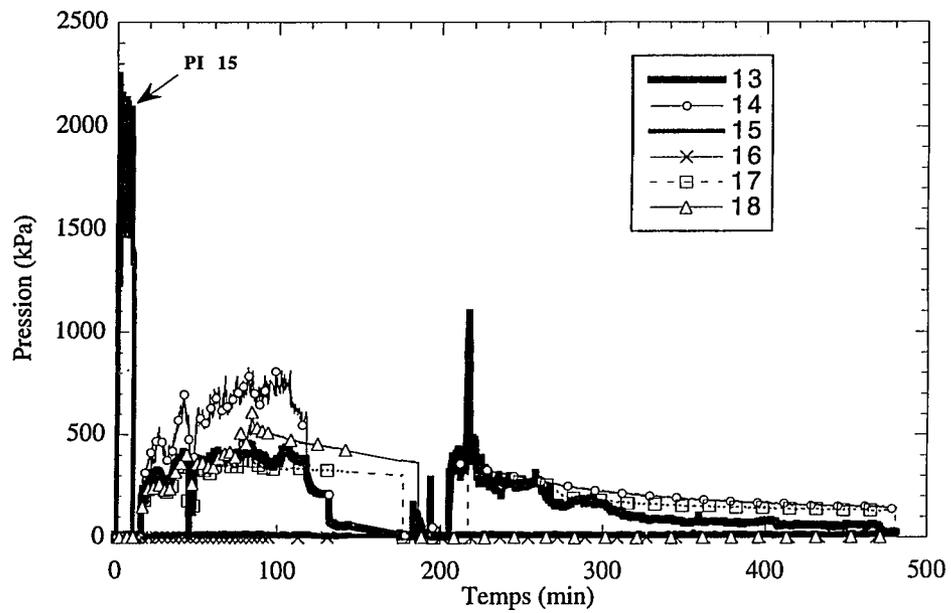


Figure A5 Variation de la pression durant l'injection (capteurs 13 à 18)

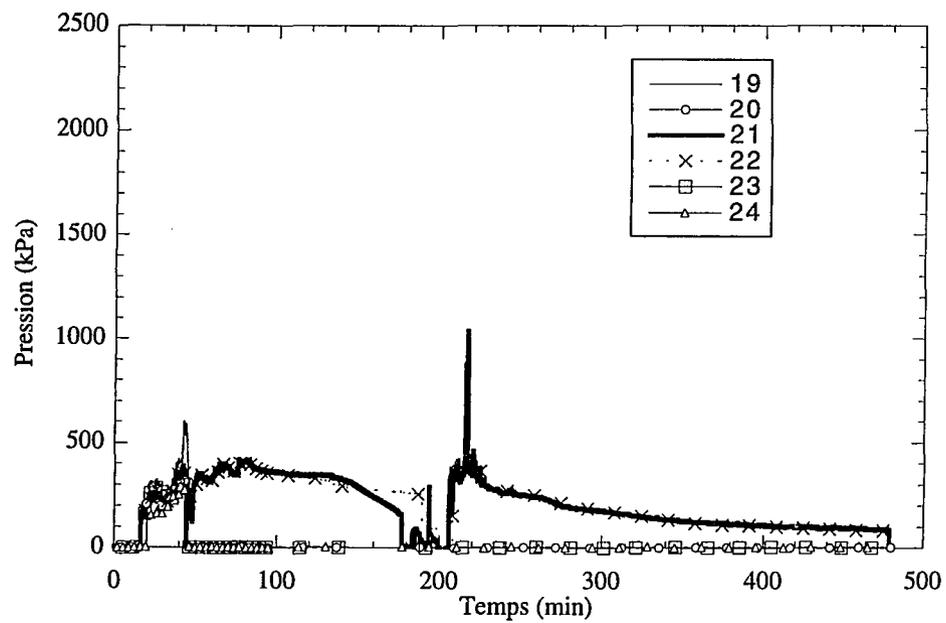


Figure A6 Variation de la pression durant l'injection (capteurs 19 à 24)

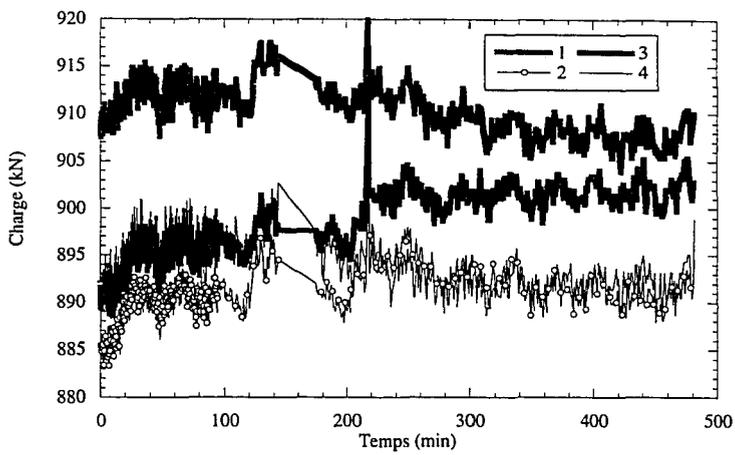


Figure A7 Variation des forces de réaction (cellules 1 à 4)

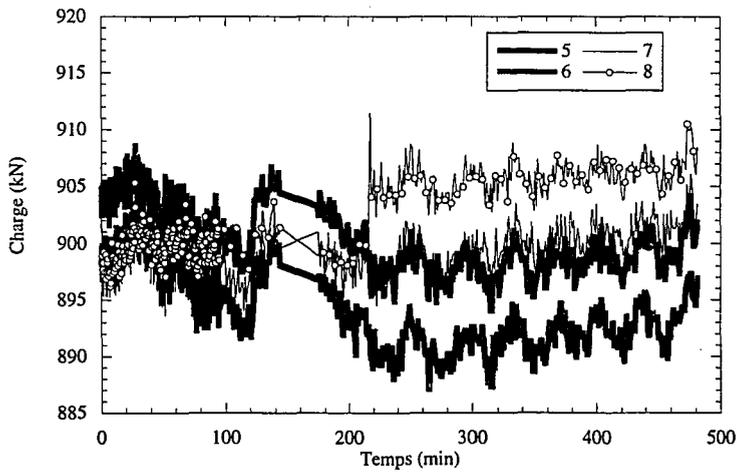


Figure A8 Variation des forces de réaction (cellules 5 à 8)

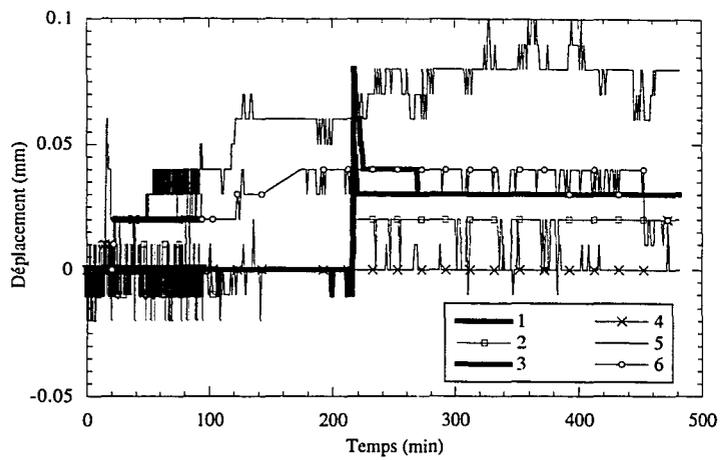


Figure A9 Déplacements (capteurs 1 à 6)

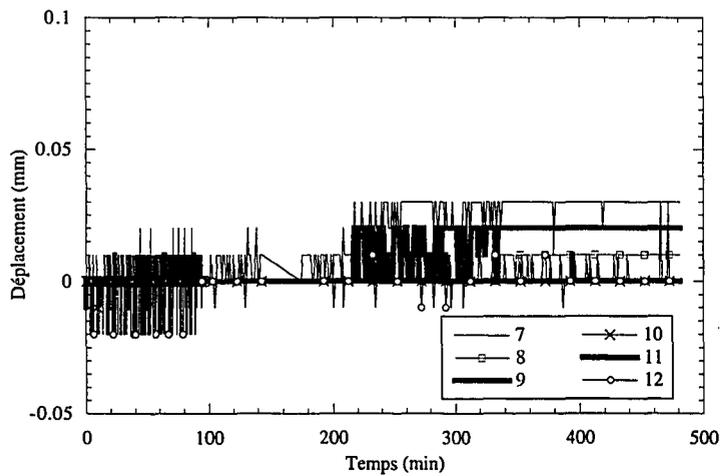


Figure A10 Déplacements (capteurs 7 à 12)

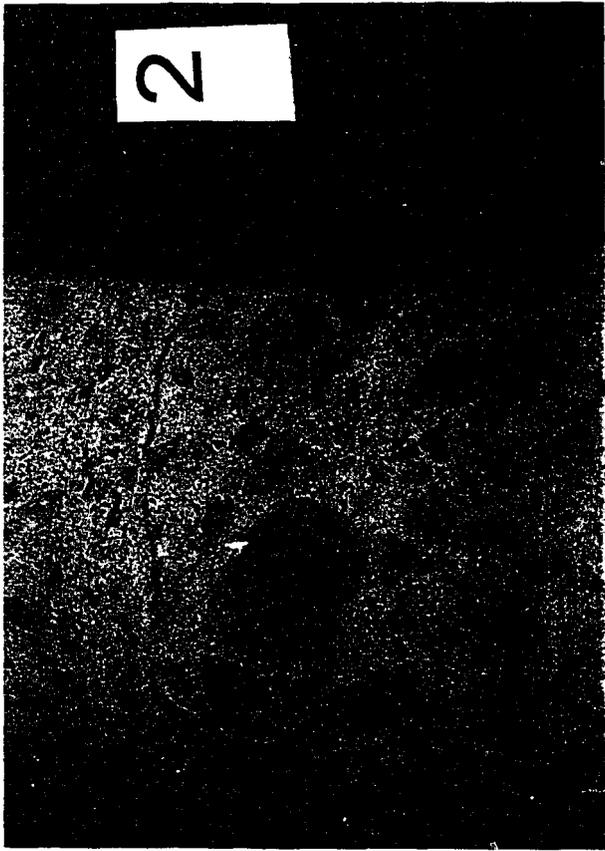


Figure A11 Carotte B3 montrant une fissure injectée de 0,6 mm



Figure A12 Carotte B4 montrant une fissure injectée de 0,33 mm

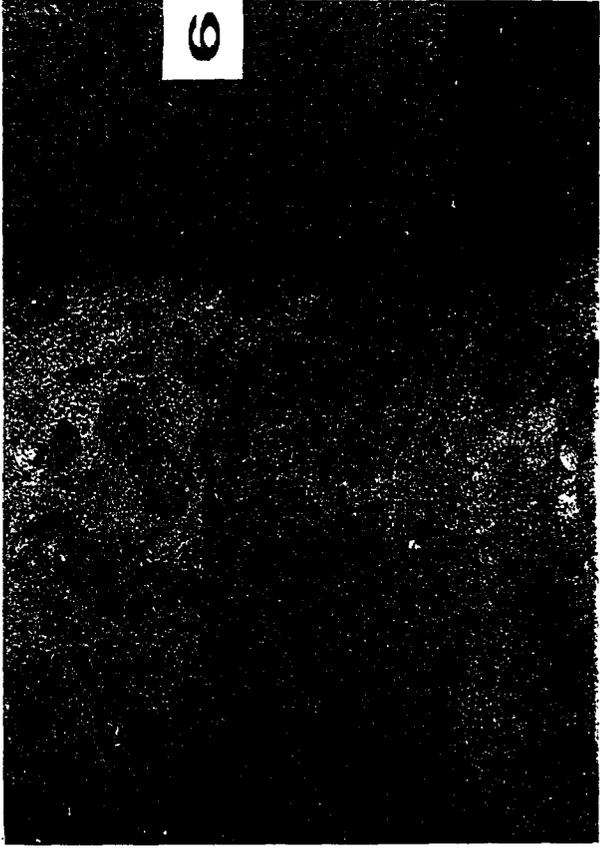


Figure A13 Carotte B5 montrant une fissure injectée de 0,25 mm



Figure A14 Carotte B6 montrant une fissure injectée de 0,2 mm

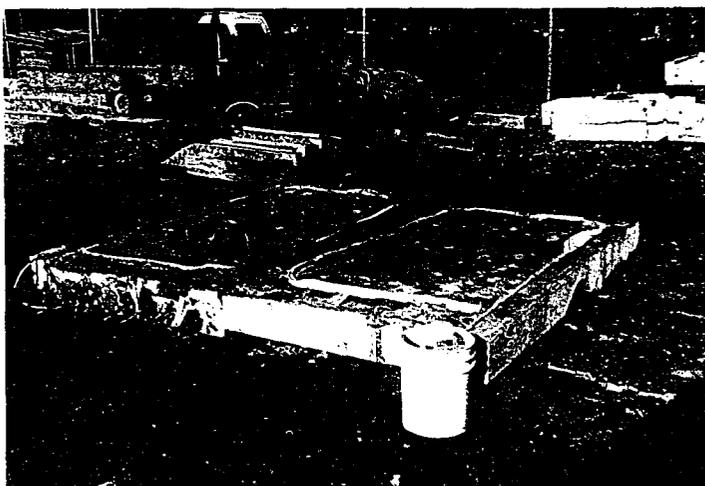


Figure A15 Deux parties de la dalle 31

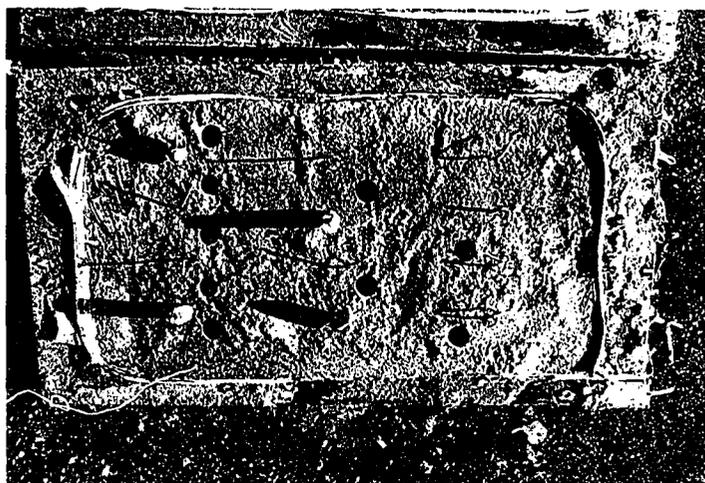


Figure A16 Partie inférieure de la dalle 31

Annexe B

Résultats de l'injection de la dalle 32

Tableau B1

Caractéristiques rhéologiques du coulis stable à base de ciment microfin Spinor A12
Par Claude Dumont

Mélange	Unités	Rapport E/C (Massique)				
		0.5	0.6	0.7	0.8	1
		Rapport E/C (Volumique)				
		0.45	0.54	0.63	0.72	0.9
Masse volumique	Kg/m3	1833	1733	1633	1583	1500
Écoulement	sec	105	55	49	39	34
Temps de prise	Hrs	9	10	11	12	14
Viscosité	cP	78.6	24.7	15.2	9.1	5.7
Cohésion	Pa	3.35	2.75	2.45	1.9	1.45
Ressuage	%	99.4	98.9	97.5	96.9	95.6

Calculs effectués sur la base d'une masse volumique de 900 kg/m3 pour un ciment non compacté.
(Valeur vérifiée en laboratoire sur un volume de ciment vibré mais non compacté mécaniquement)

- Capteurs de pression • Capteurs de déplacement
- Cellules de charge ⊗ Carottes

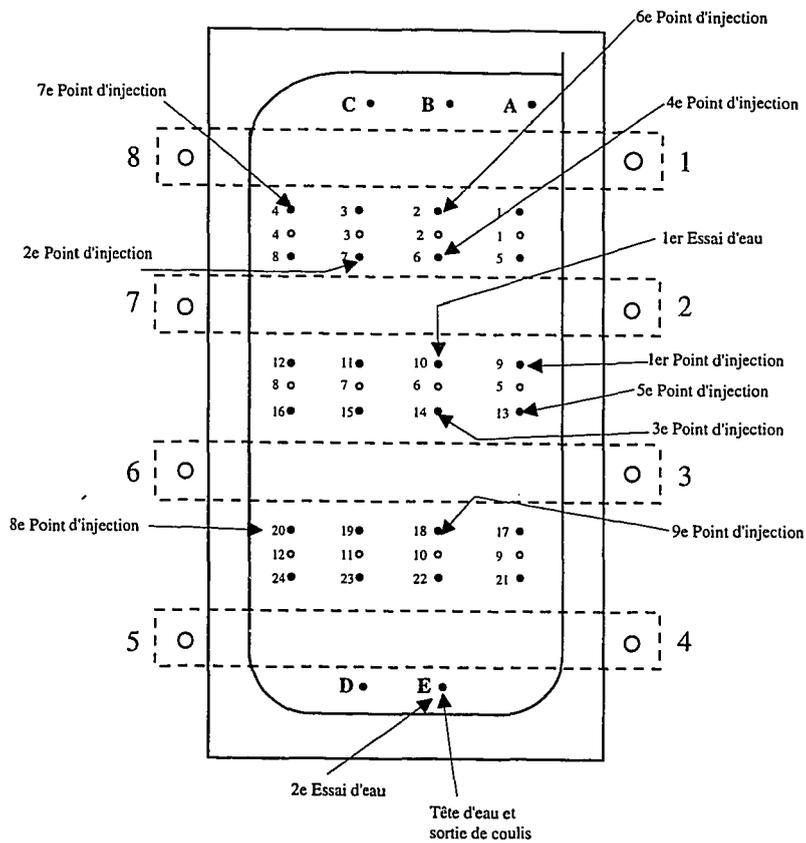


Figure B1 Configuration de la dalle 32

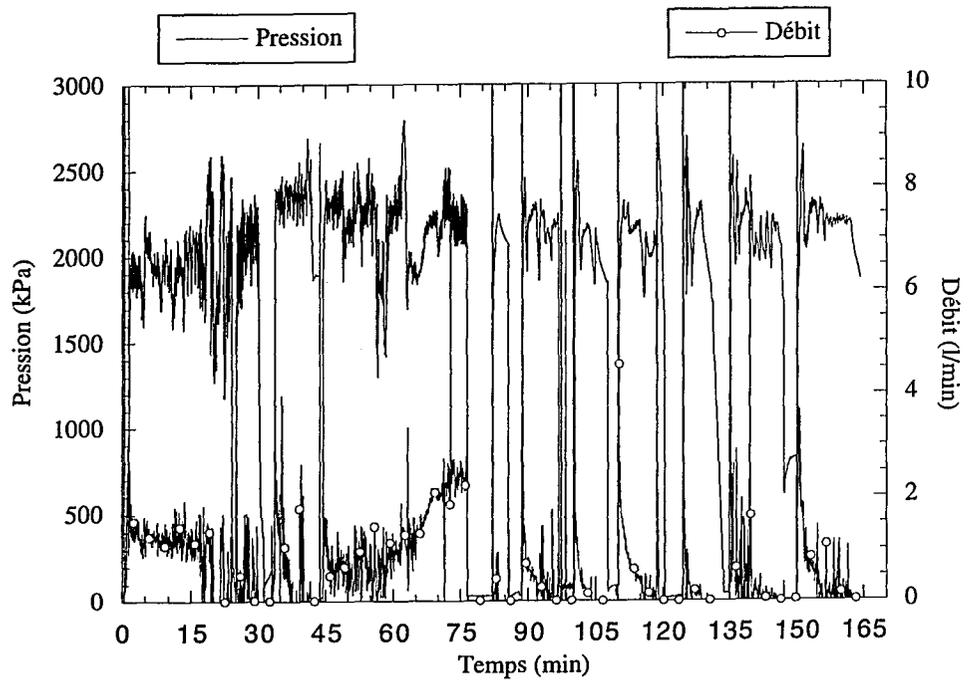


Figure B2 Débit et pression au point d'injection

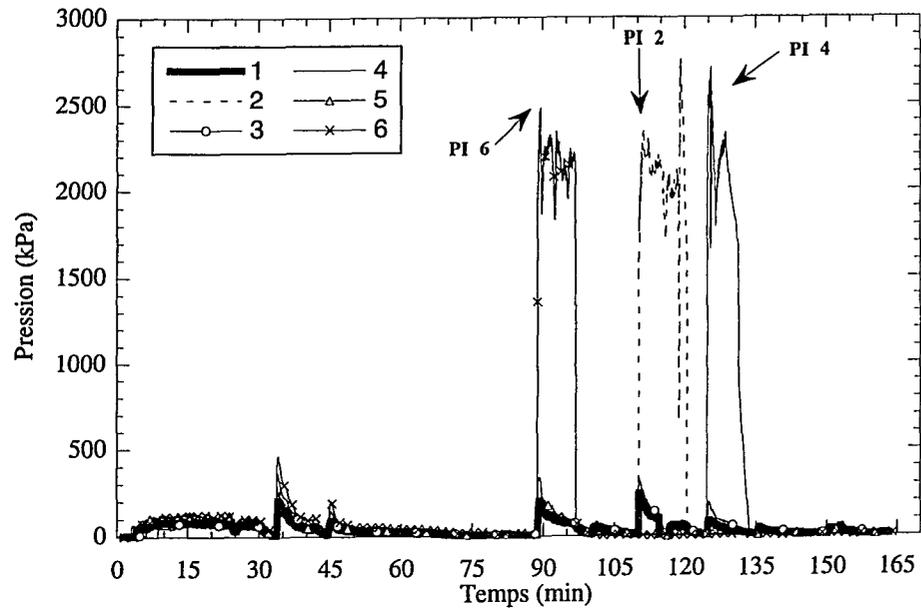


Figure B3 Variation de la pression durant l'injection (capteurs 1 à 6)

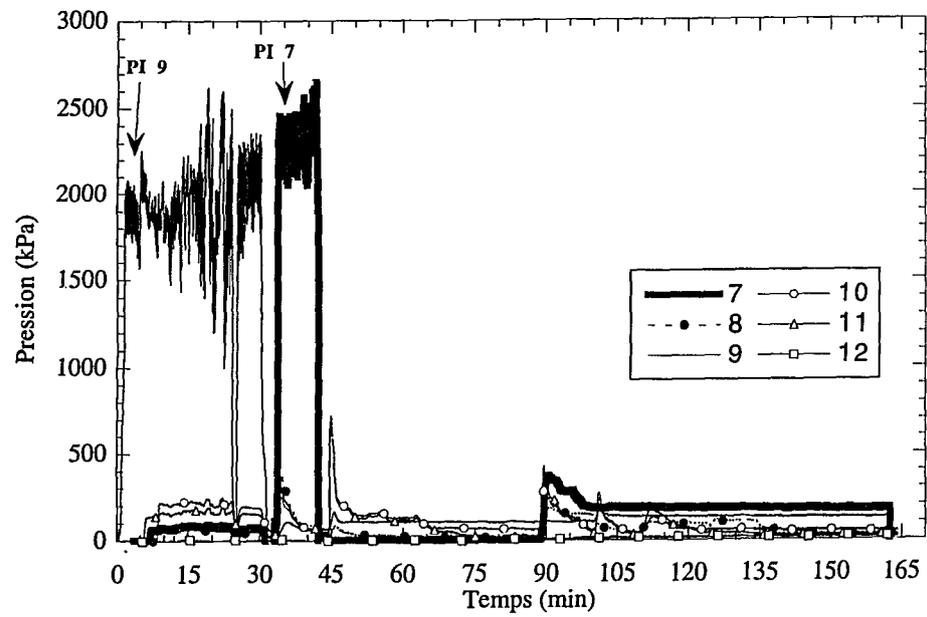


Figure B4 Variation de la pression durant l'injection (capteurs 7 à 12)

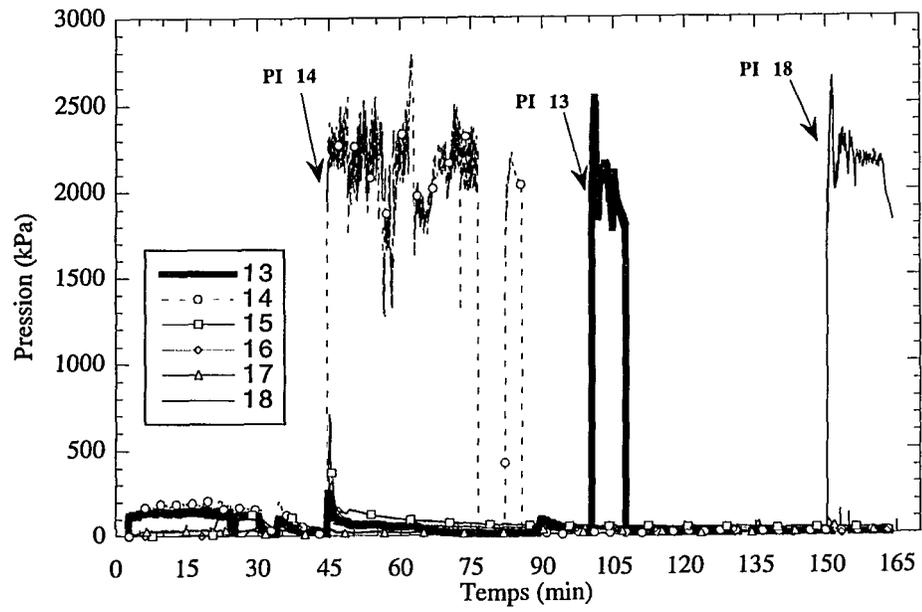


Figure B5 Variation de la pression durant l'injection (capteurs 13 à 18)

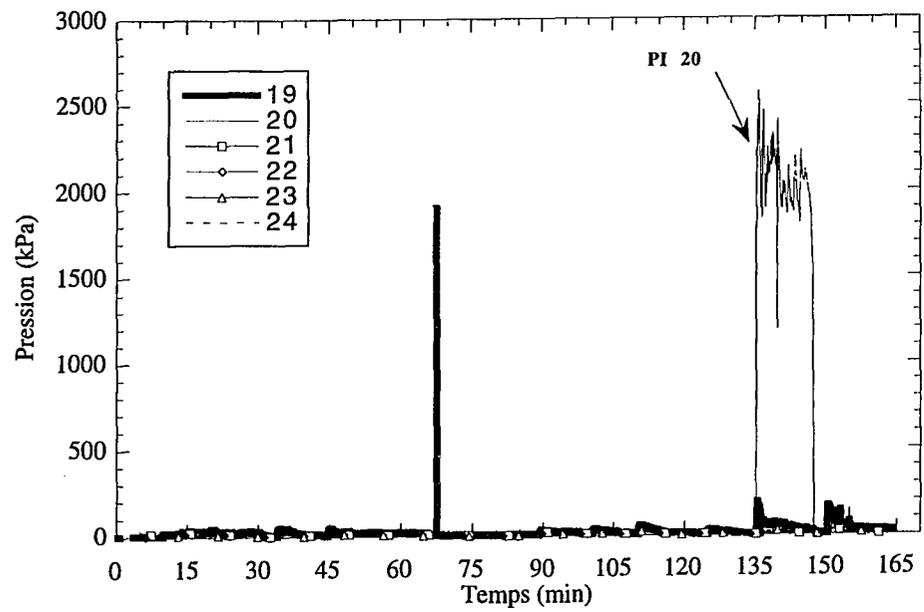


Figure B6 Variation de la pression durant l'injection (capteurs 19 à 24)

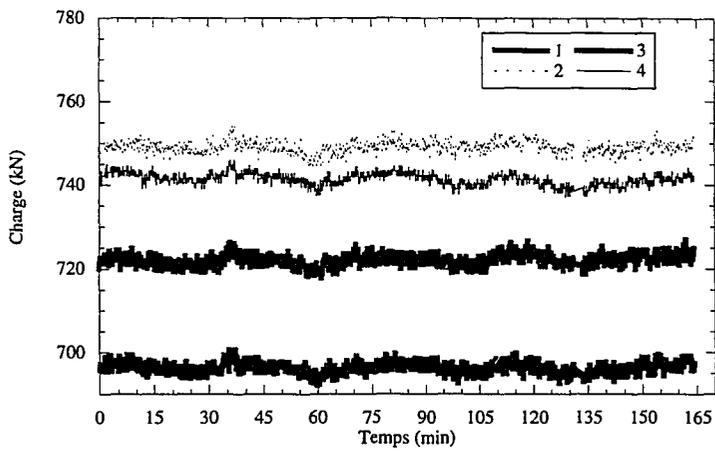


Figure B7 Variation des forces de réaction (cellules 1 à 4)

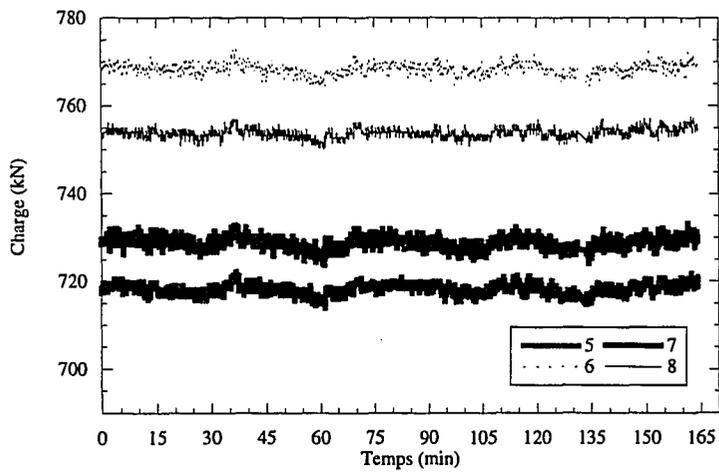


Figure B8 Variation des forces de réaction (cellules 5 à 8)

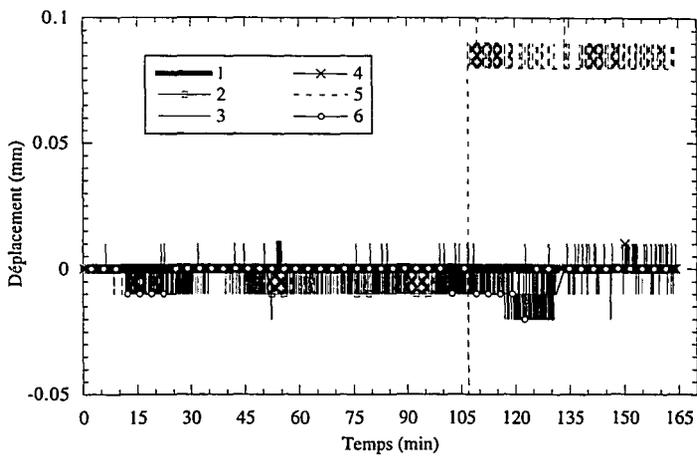


Figure B9 Déplacements (capteurs 1 à 6)

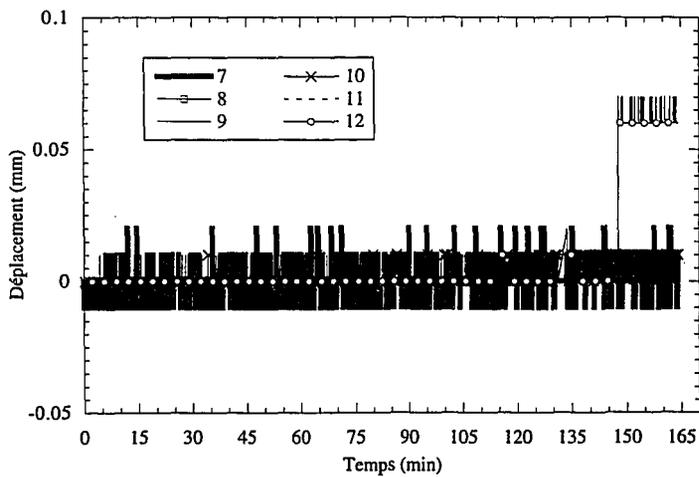


Figure B10 Déplacements (capteurs 7 à 12)

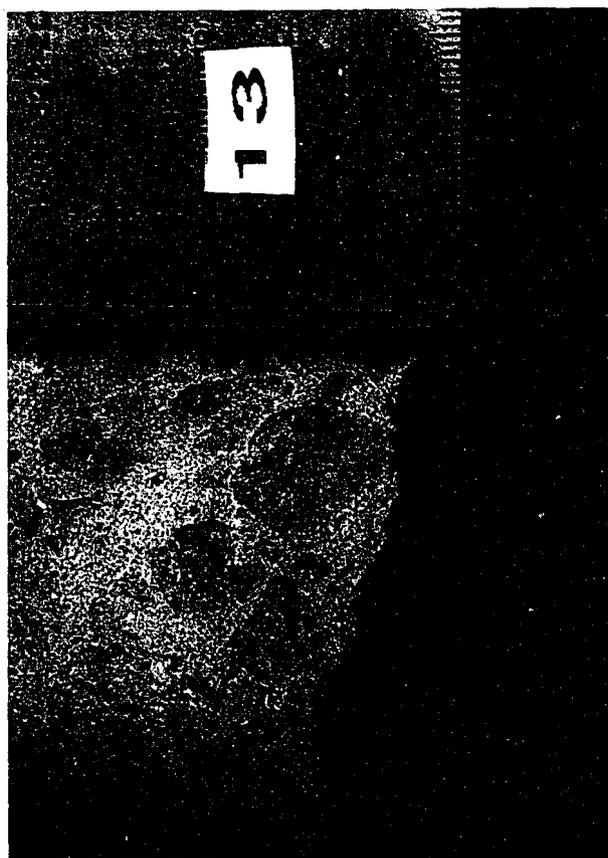


Figure B11 Carotte B1 montrant une fissure injectée de 0,1 mm

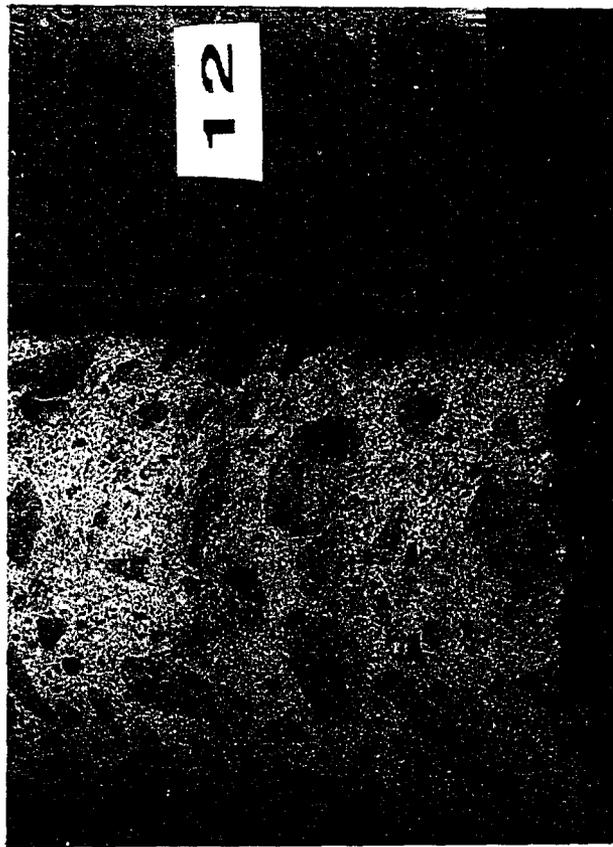


Figure B12 Carotte B7 montrant une fissure injectée de moins de 0,1 mm

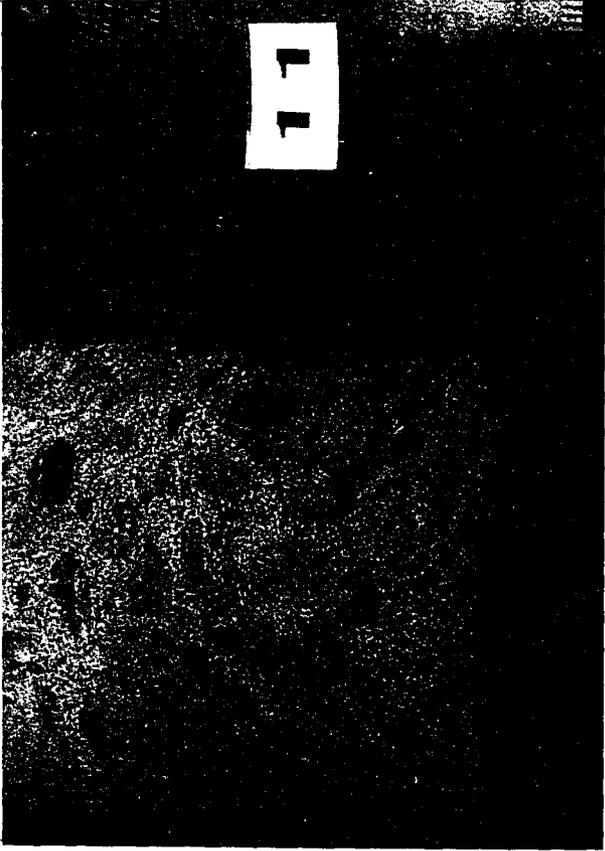


Figure B13 Carotte B11 montrant une fissure injectée de moins de 0,1 mm

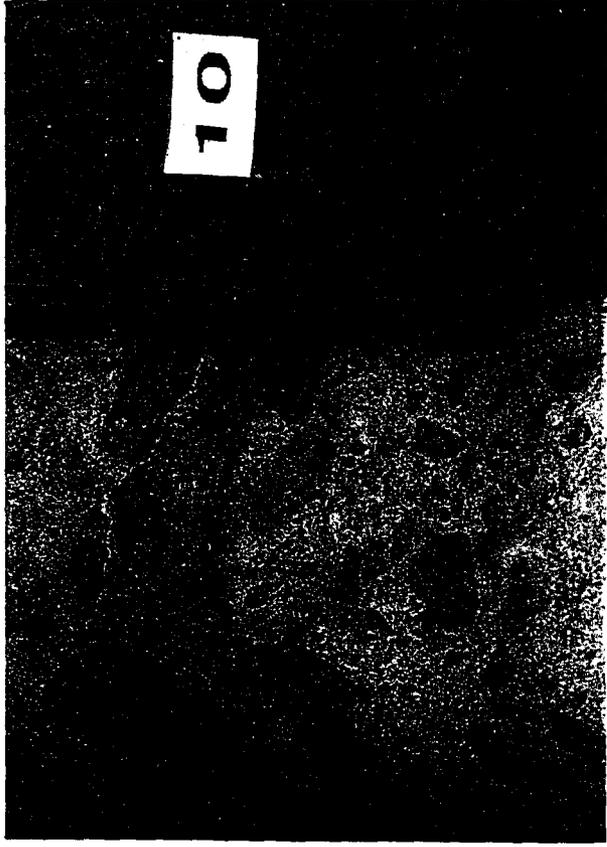


Figure B14 Carotte M2 montrant une fissure injectée de 0,1 mm

Annexe C

**Résultats de l'essai d'eau
et
de l'injection de la dalle 33**

- Capteurs de pression
- Capteurs de déplacement
- Cellules de charge
- ⊙ Carottes

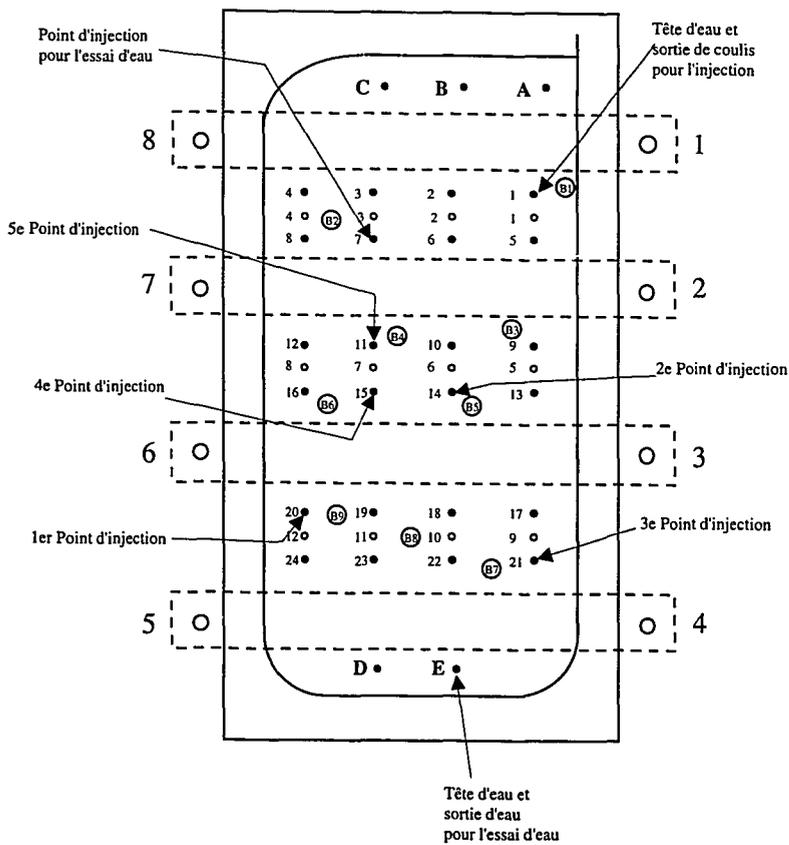


Figure C1 Configuration de la dalle 33

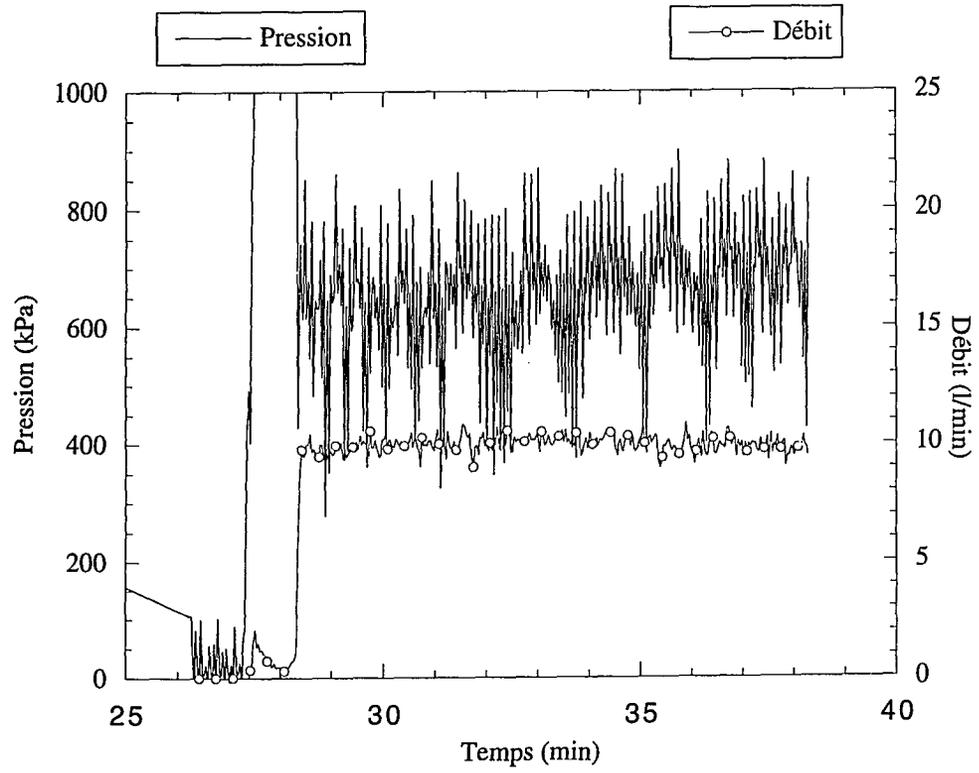


Figure C2 Débit et pression au point d'injection durant l'essai d'eau

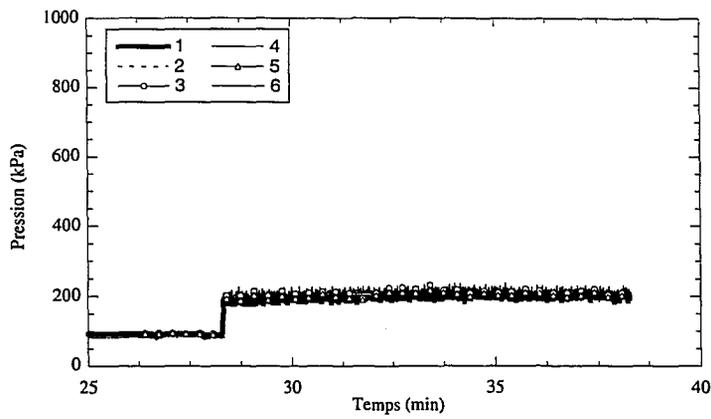


Figure C3 Variation de la pression durant l'essai d'eau (capteurs 1 à 6)

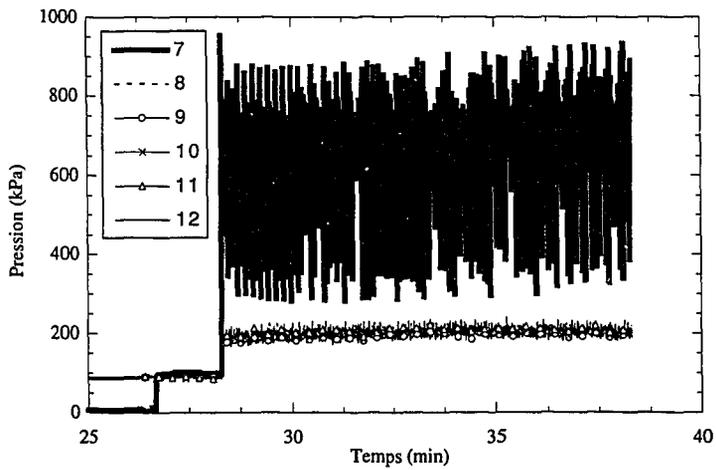


Figure C4 Variation de la pression durant l'essai d'eau (capteurs 7 à 12)

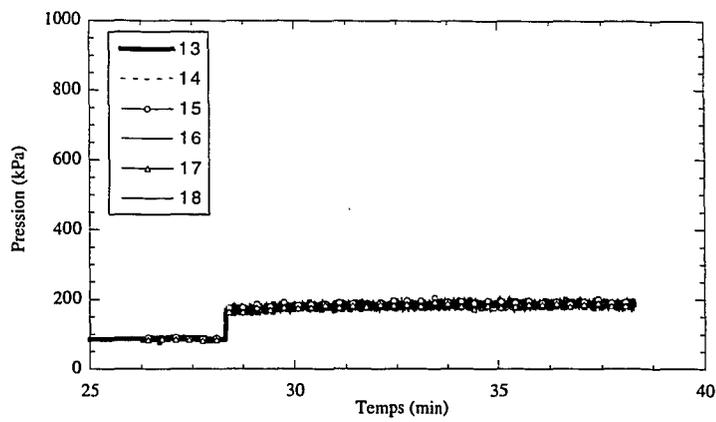


Figure C5 Variation de la pression durant l'essai d'eau (capteurs 13 à 18)

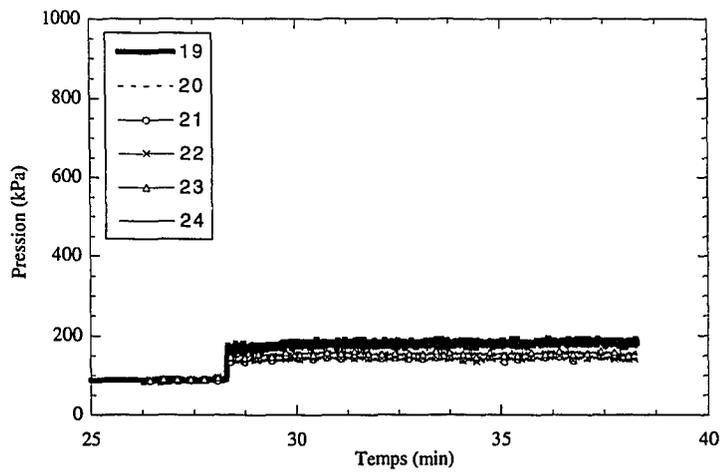


Figure C6 Variation de la pression durant l'essai d'eau (capteurs 19 à 24)

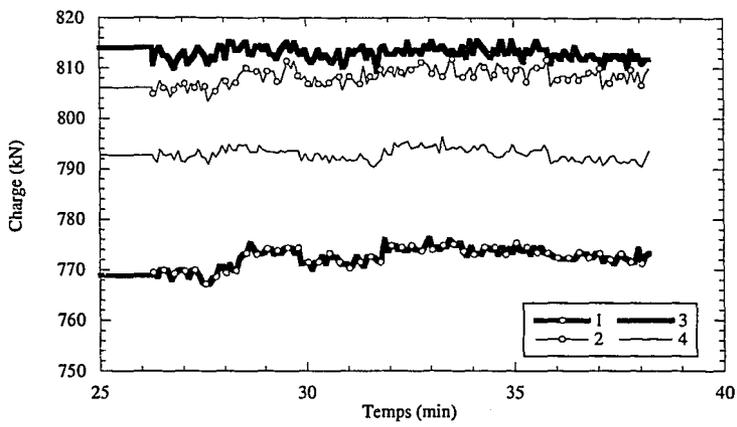


Figure C7 Variation des forces de réaction durant l'essai d'eau (cellules 1 à 4)

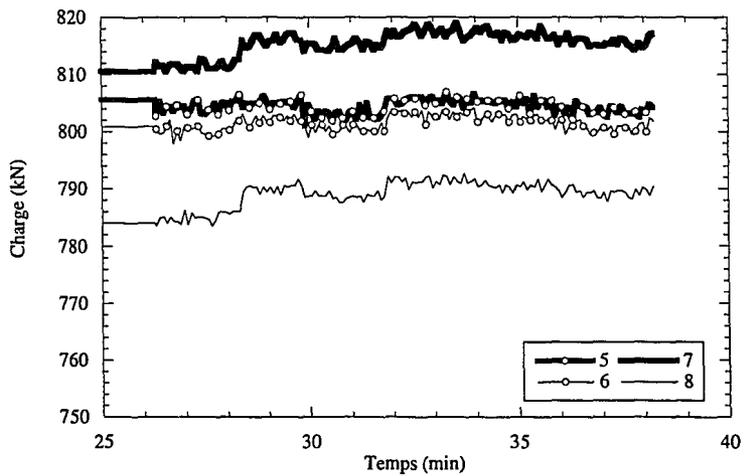


Figure C8 Variation des forces de réaction durant l'essai d'eau (cellules 5 à 8)

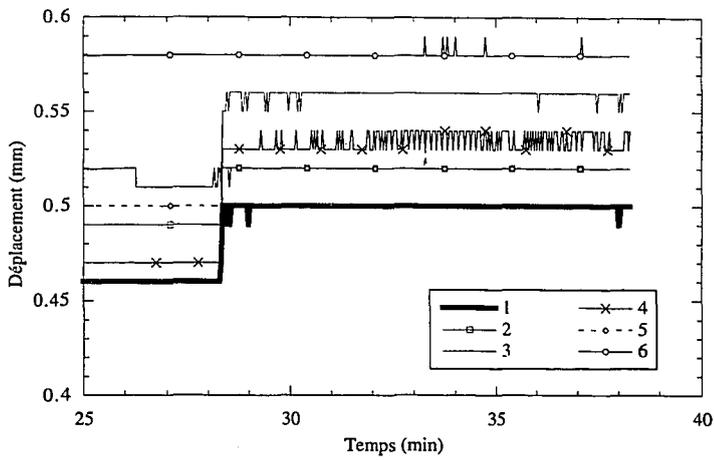


Figure C9 Déplacements durant l'essai d'eau (capteurs 1 à 6)

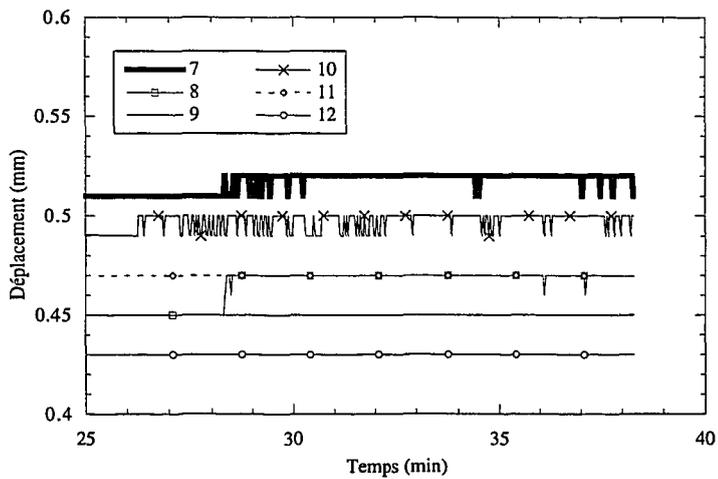


Figure C10 Déplacements durant l'essai d'eau (capteurs 7 à 12)

Tableau C1 Caractéristiques rhéologiques du coulis stable à base de ciment Portland type 30
Par Claude Dumont

Mélange	Unités	Rapport E/C (Volumique)				
		0.6	0.75	1	1.5	2
		Rapport E/C (Massique)				
		0.43	0.54	0.71	1.07	1.43
Masse volumique	Kg/m ³	1884	1755	1638	1478	1360
Écoulement	sec	63	48	38	34	32
Temps de prise	h	5	6.5	8	11	18
Viscosité	cP	42.2	23.4	11.2	6.7	5.5
Cohésion	Pa	2.05	1.85	1.8	1.45	1.25
Ressuage	%	0.6	2	20	28	36

Calculs effectués sur la base d'une masse volumique de 1400 kg/m³ pour un ciment non compacté.
 (Valeur vérifiée en laboratoire sur un volume de ciment vibré mais non compacté mécaniquement)

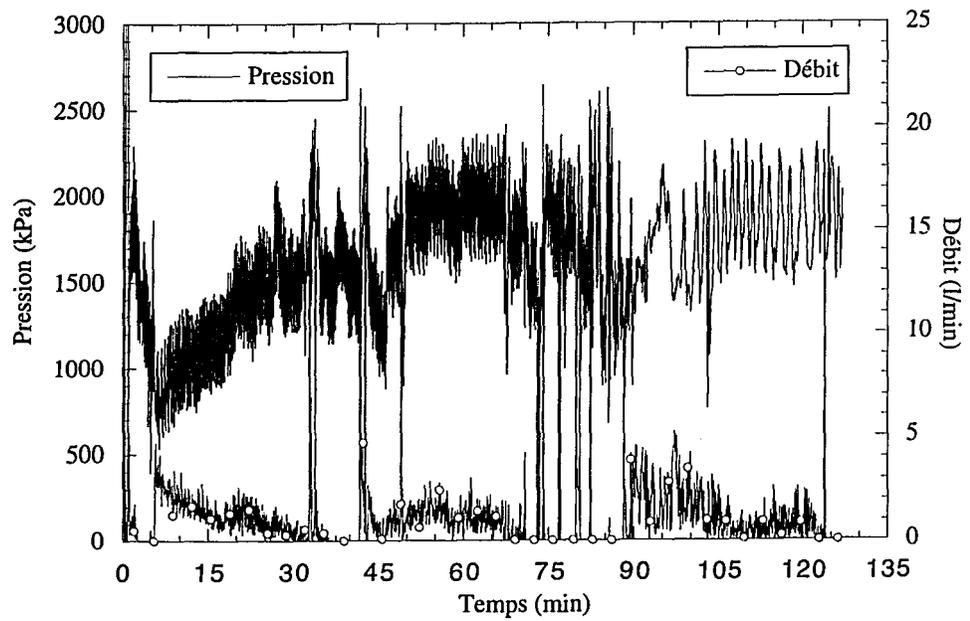


Figure C11 Débit et pression au point d'injection durant l'injection

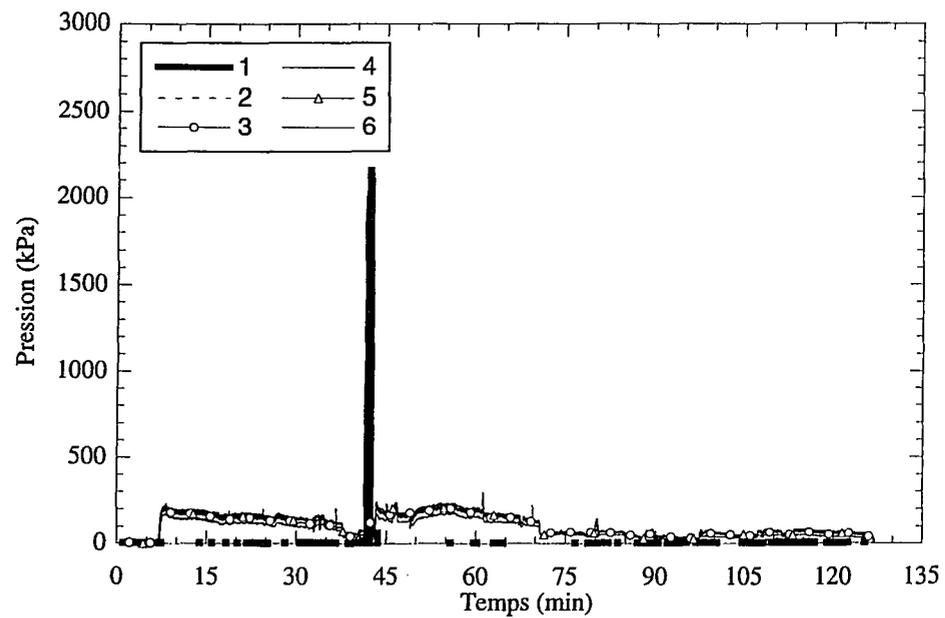


Figure C12 Variation de la pression durant l'injection (capteurs 1 à 6)

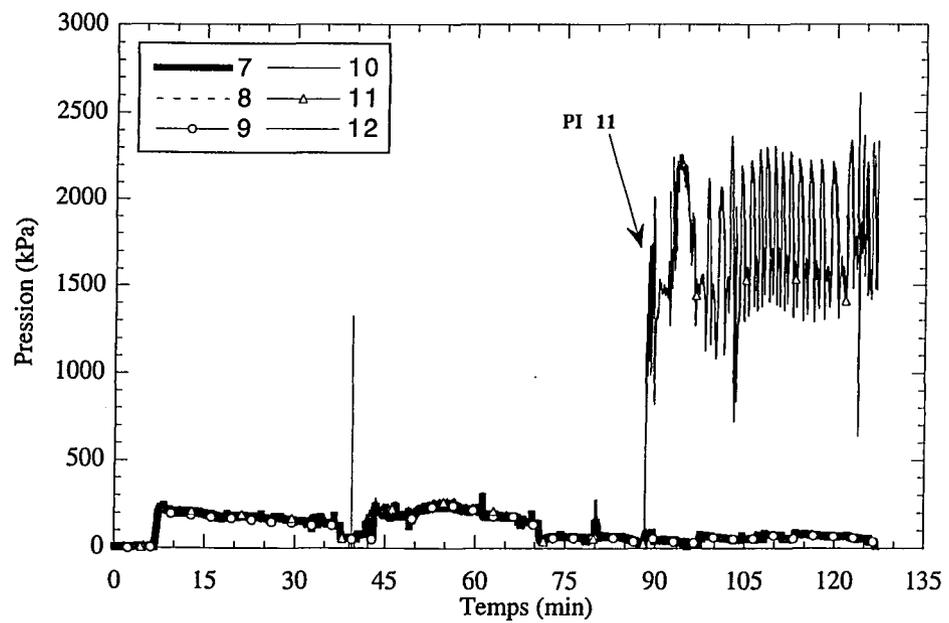


Figure C13 Variation de la pression durant l'injection (capteurs 7 à 12)

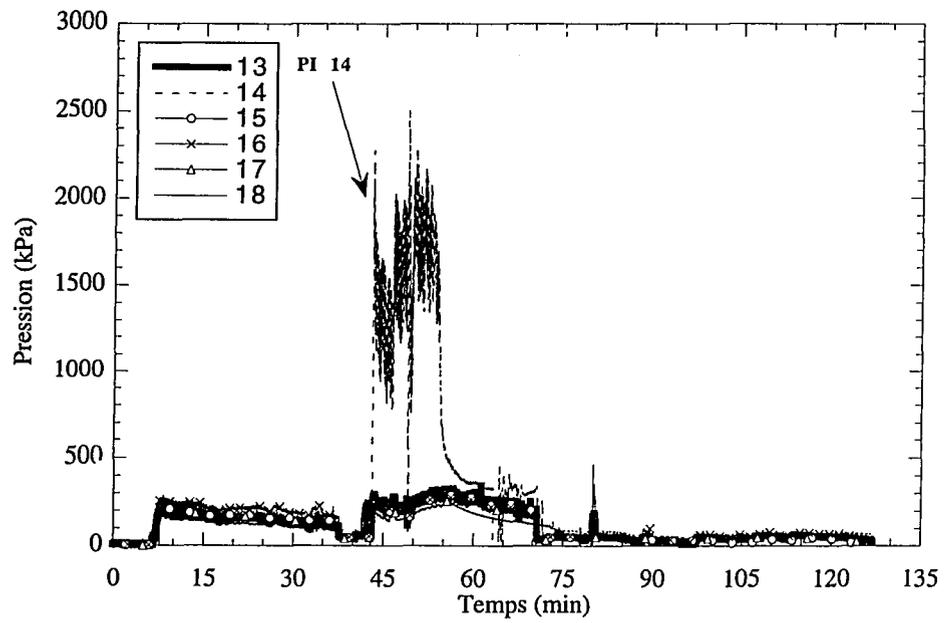


Figure C14 Variation de la pression durant l'injection (capteurs 13 à 18)

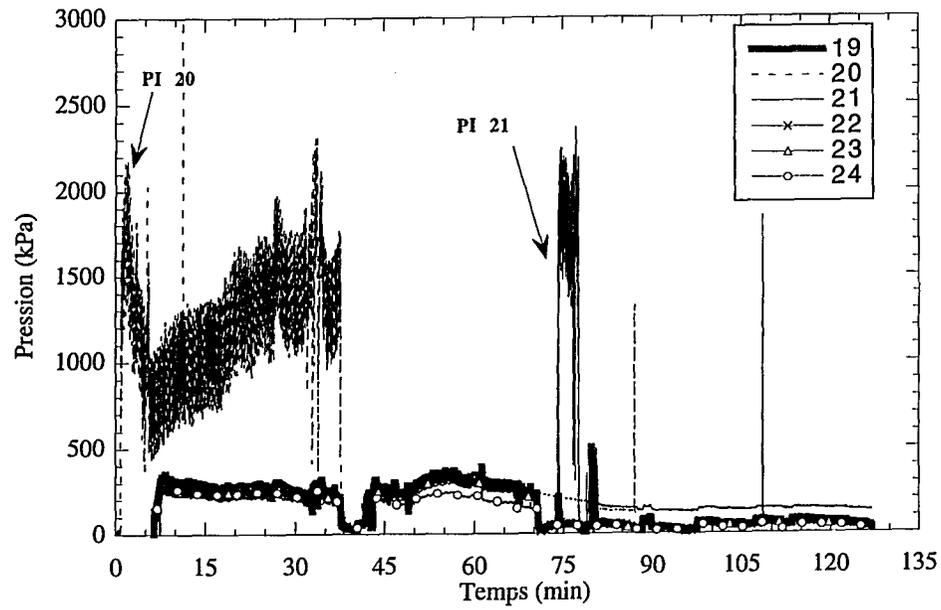


Figure C15 Variation de la pression durant l'injection (capteurs 19 à 24)

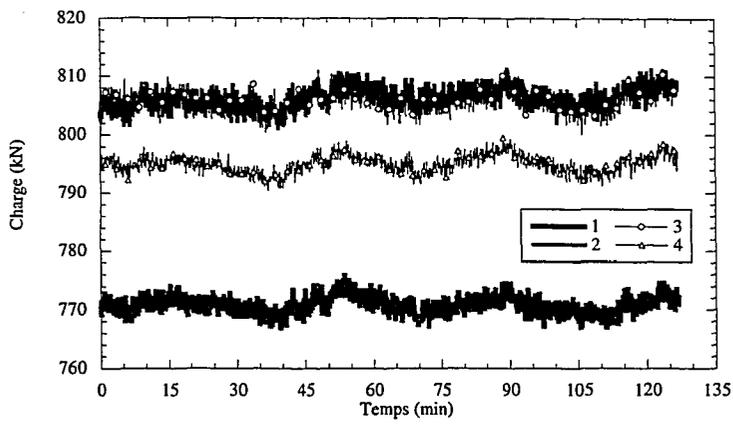


Figure C16 Variation des forces de réaction durant l'injection (cellules 1 à 4)

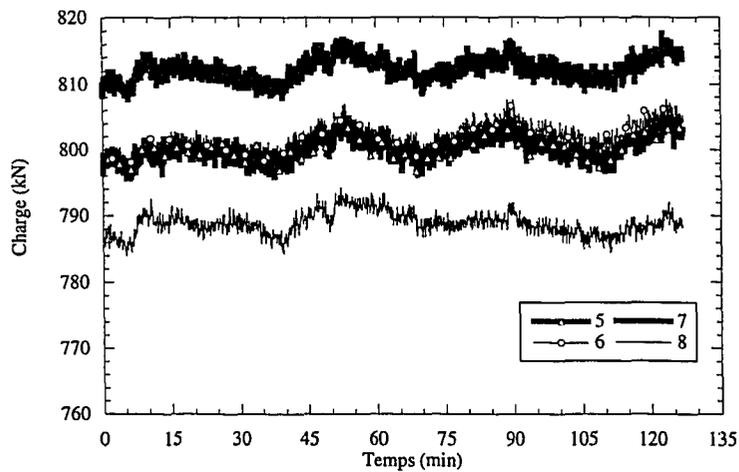


Figure C17 Variation des forces de réaction durant l'injection (cellules 5 à 8)

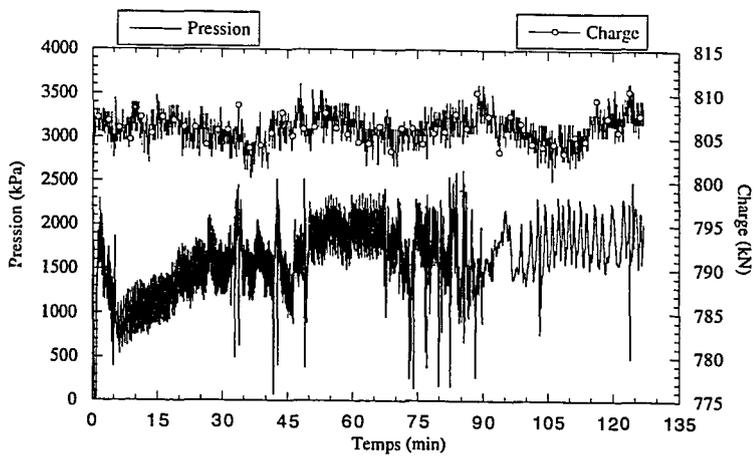


Figure C18 Évolution de la réaction à la cellule 3 et de la pression durant l'injection

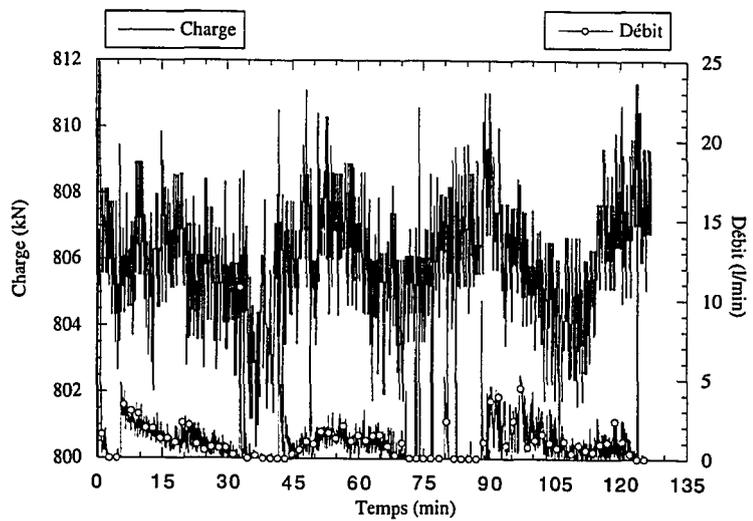


Figure C19 Évolution de la réaction à la cellule 3 et du débit durant l'injection

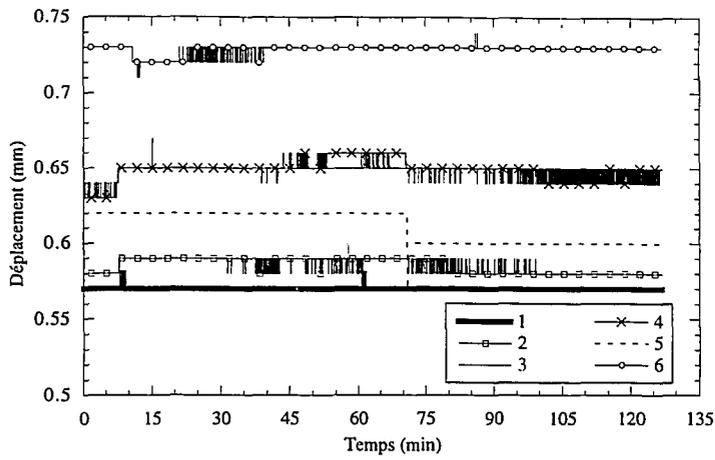


Figure C20 Déplacements durant l'injection (capteurs 1 à 6)

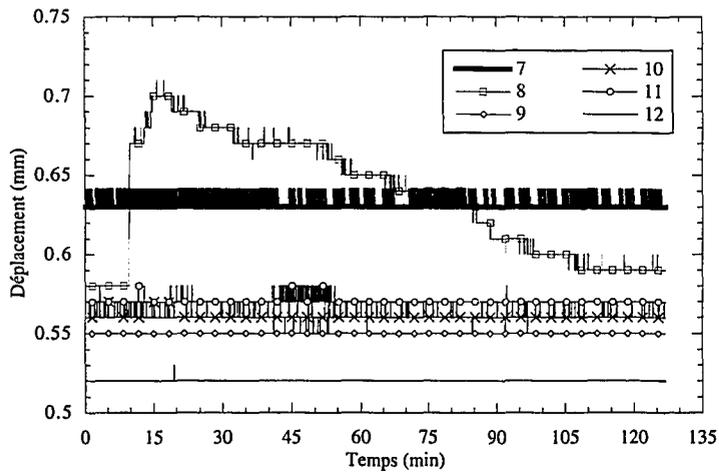


Figure C21 Déplacements durant l'injection (capteurs 7 à 12)

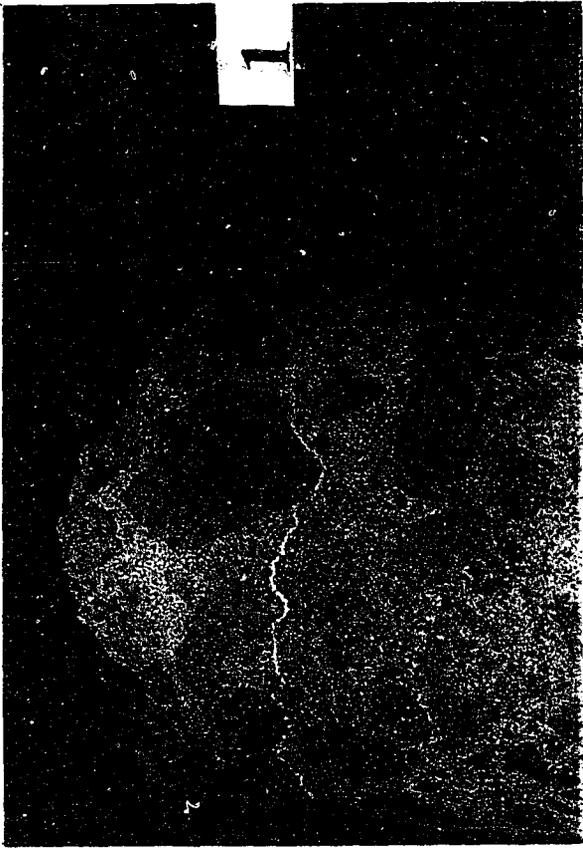


Figure C22 Carotte B1 montrant une fissure injectée de 0,4 mm

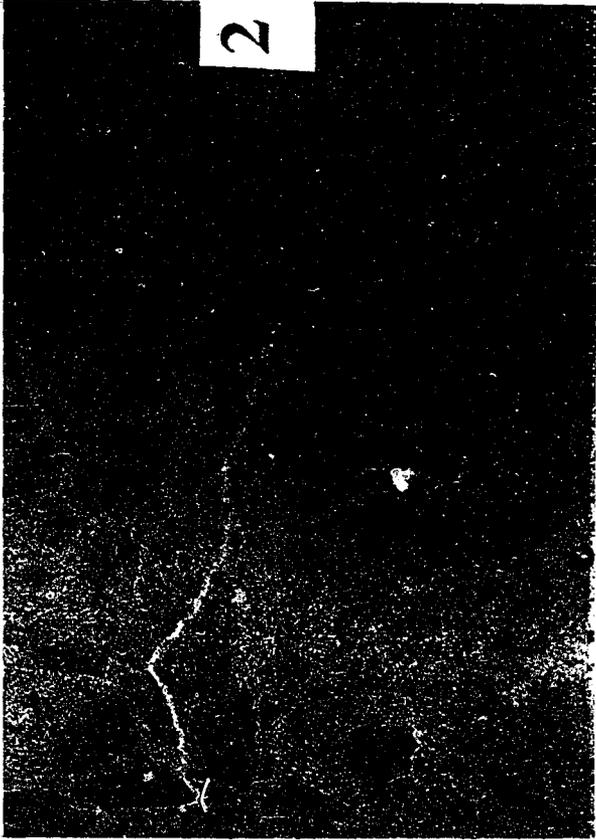


Figure C23 Carotte B2 montrant une fissure injectée de 0,4 mm

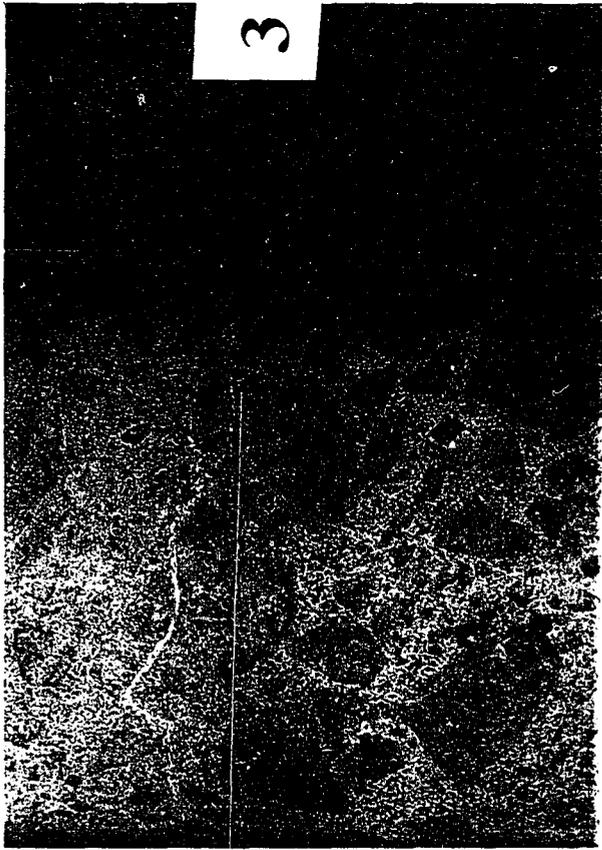


Figure C24 Carotte B3 montrant une fissure injectée de 0,5 mm

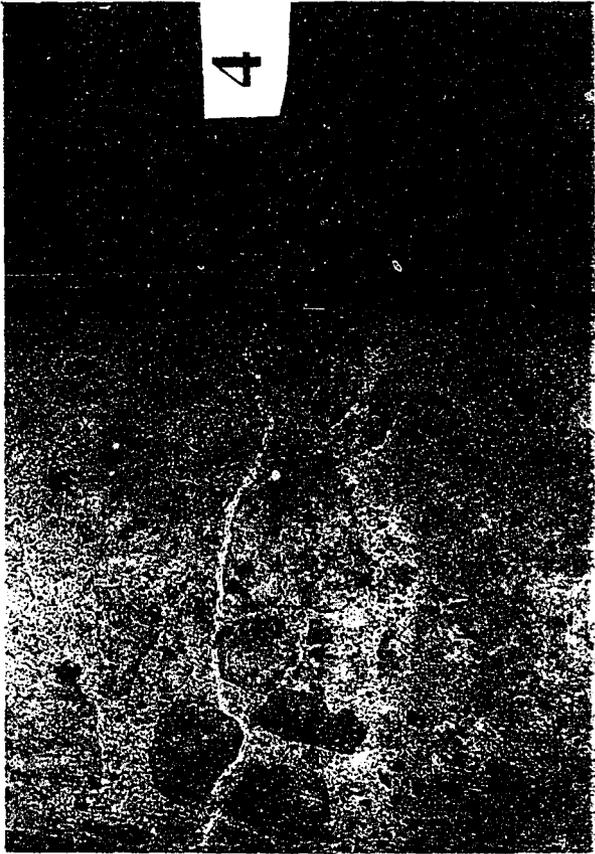


Figure C25 Carotte B5 montrant une fissure injectée de 0,4 mm



Figure C26 Carotte B7 montrant une fissure injectée de 0,33 à 0,5 mm

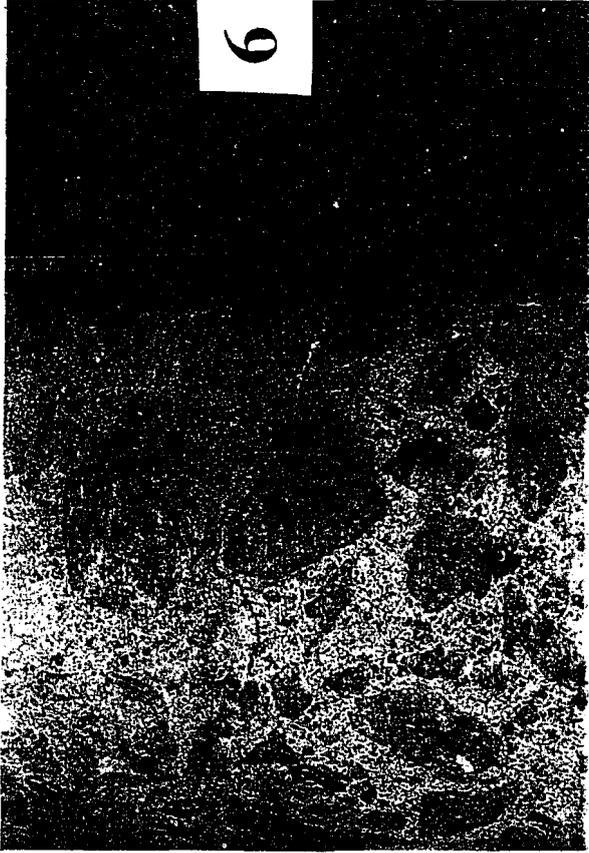


Figure C27 Carotte B9 montrant une fissure injectée de 0,3 à 0,5 mm