

NORMAND JR BÉLAIR

**CONTRIBUTION À LA MISE AU POINT D'UNE
PROCÉDURE DE CARACTÉRISATION
QUANTITATIVE DES SURFACES EN BÉTON EN
VUE DE TRAVAUX DE RÉFECTION**

Mémoire présenté
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval
dans le cadre du programme de maîtrise en Génie Civil
pour l'obtention du grade de maître ès sciences (M. Sc.)

FACULTÉ DES SCIENCES ET GÉNIES
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

DÉCEMBRE, 2005

Résumé

Ce mémoire porte sur les surfaces préparées en béton en vue de travaux de réfection. L'objectif principal vise le développement d'une méthode de caractérisation quantitative des surfaces préparées. Le projet comporte également deux objectifs spécifiques : évaluer l'influence des méthodes de préparation sur l'intégrité des surfaces en béton et vérifier l'existence d'une corrélation entre la rugosité de surface et l'adhérence de réparations en béton. Afin d'atteindre ces objectifs, le projet a été divisé en trois principaux volets où plusieurs essais expérimentaux ont été réalisés, ainsi qu'une modélisation de l'essai d'adhérence.

Le premier volet expérimental porte sur l'évaluation de l'intégrité des surfaces préparées. Les essais ont démontré que l'endommagement du béton réduit de manière significative la résistance de la surface préparée. Le second volet présente les résultats qui ont conduit au développement et à la validation d'une nouvelle méthode d'évaluation quantitative des surfaces préparées. La méthode permet de réaliser des essais de caractérisation rapidement (environ 2 heures) sur des surfaces tant horizontales, verticales qu'en surplombs. Le troisième volet expérimental comporte l'étude de la rugosité de surface et de l'adhérence des réparations en béton. Ce dernier volet inclut une partie expérimentale et une partie modélisation. Les résultats montrent que l'endommagement du substrat est beaucoup plus critique que la rugosité de surface. En effet, aucune corrélation entre la rugosité de surface et l'adhérence des réparations en béton n'a été observée à l'échelle d'observation étudiée. Pour terminer, des recommandations sont émises concernant les critères d'acceptation relatifs à la préparation de surface et à l'adhésion en place d'une réparation.

Abstract

The subject of this master is surface preparation of concrete for repair works. The main objective aims at developing a quantitative characterization method for the prepared surfaces. The project also includes two specific objectives: evaluate the influence of preparation methods on the integrity of concrete surfaces and verify the existence of a correlation between the surface roughness and the bond of the concrete repair. In order to achieve these goals, the project was divided into three parts where several experimental tests were carried out, as well as a modeling of the bond test.

The first experimental part evaluates the integrity of the prepared surfaces. The tests revealed that damage in concrete decreases significantly the resistance of the prepared surface. The second part presents the results on the development and validation of a new quantitative evaluation method of prepared surfaces. The method makes it possible to quickly carry out characterization tests (approximately 2 hours) on prepared surfaces (horizontal, vertical or overhanging). The third experimental part deals with the study of the surface roughness and the bond of concrete repairs. This last segment includes an experimental and modeling part. The results show that substrate damage is more critical than surface roughness. In fact, no correlation between surface roughness and bond of concrete repairs was observed on the studied observation scale. Finally, recommendations are given for acceptance criteria relating to the surface preparation and adhesion of the in place repair.

Avant-propos

Je tiens d'abord à remercier messieurs Benoit Bissonnette et Luc Courard, respectivement mon directeur et mon codirecteur de maîtrise, pour m'avoir donné l'occasion de réaliser ce projet, ainsi que pour leur soutien, leurs conseils et leur confiance à mon égard. Je les remercie également de m'avoir permis d'effectuer un stage de 5 semaines à l'Université de Liège, spécialement monsieur Luc Courard pour son hospitalité et ses preuves d'amitié pendant ce séjour.

Je tiens aussi à remercier tout le personnel du centre de recherche sur les infrastructures en béton (CRIB) de l'Université Laval pour leur aide et leur support tout au long de ce projet. Mes remerciements s'adressent particulièrement à Fabien Perez, pour son support scientifique et moral, ainsi que pour son amitié. Je tiens également à remercier François Lebeau, Michel Küntz, Maxim Morency, François Paradis, et Dennis Burns, pour leurs conseils avisés et leur amitié.

Mes derniers remerciements s'adressent à toute ma famille et à mes amis pour leurs encouragements et leur soutien tout au long de ce projet.

Table des matières

CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 MISE EN CONTEXTE.....	1
1.2 PROBLÉMATIQUE.....	2
1.3 OBJECTIFS ET DESCRIPTION DU PROJET	2
1.4 STRUCTURE DU DOCUMENT.....	4
CHAPITRE 2 REVUE DE LA DOCUMENTATION	5
2.1 SYSTÈME DE RÉPARATION	5
2.1.1 Définition.....	5
2.1.2 Microstructure de l'interface	6
2.1.3 Mécanismes d'adhésion	7
2.2 PARAMÈTRES INFLUENÇANT L'ADHÉRENCE	9
2.2.1 Rugosité et intégrité du substrat.....	9
2.2.2 Propriétés du matériau de réparation.....	11
2.2.3 Mouillage préalable du substrat	14
2.3 ÉVALUATION DE LA RÉSISTANCE DU BÉTON IN SITU	15
2.3.1 Essai pull-off.....	15
2.3.2 Essai pull-out.....	17
2.3.3 Essai au marteau Schmidt.....	19
2.4 ÉVALUATION DE LA RUGOSITÉ DE SURFACE	20
2.4.1 Tache de sable.....	20
2.4.2 Peigne articulé.....	21
2.4.3 Profilomètre d'état de surface.....	22
2.4.4 Triangulation laser.....	23
2.4.5 Moiré de projection.....	23
2.5 MODÉLISATION DE L'ESSAI D'ADHÉRENCE PAR TRACTION.....	24
2.6 CONCLUSION.....	28
CHAPITRE 3 ÉVALUATION DE L'INTÉGRITÉ DES SURFACES PRÉPARÉES	29
3.1 INTRODUCTION.....	29
3.2 MÉTHODOLOGIE.....	29
3.2.1 Corps d'épreuves.....	29
3.2.2 Observations au microscope binoculaire.....	30
3.2.3 Essai d'absorption capillaire	31

3.2.4	<i>Essai de cohésion en traction</i>	33
3.2.5	<i>Caractérisation des matériaux</i>	35
3.3	PRÉSENTATION DES RÉSULTATS	36
3.3.1	<i>Observations au microscope binoculaire</i>	36
3.3.2	<i>Essai d'absorption capillaire</i>	37
3.3.3	<i>Essai de cohésion en traction sur surfaces préparées</i>	42
3.4	ANALYSE DES RÉSULTATS	43
3.4.1	<i>Cohésion et observations au microscope binoculaire</i>	43
3.4.2	<i>Essais d'absorption capillaire</i>	46
3.5	CONCLUSION	50
 CHAPITRE 4 DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE DE CARACTÉRISATION QUANTITATIVE ACCÉLÉRÉE DES SURFACES PRÉPARÉES.....		51
4.1	INTRODUCTION.....	51
4.2	MÉTHODOLOGIE.....	51
4.2.1	<i>Corps d'épreuves</i>	51
4.2.2	<i>Conditions initiales de l'essai accéléré de cohésion</i>	53
4.2.3	<i>Caractérisation des matériaux</i>	55
4.3	PRÉSENTATION DES RÉSULTATS	55
4.3.1	<i>Essais préliminaires</i>	56
4.3.2	<i>Essais principaux sur dalles de béton coulé</i>	59
4.3.3	<i>Essais sur supports préparés</i>	64
4.4	ANALYSE DES RÉSULTATS	67
4.4.1	<i>Essais préliminaires</i>	67
4.4.2	<i>Essais principaux sur dalles de béton coulé</i>	71
4.4.3	<i>Essais sur supports préparés</i>	78
4.5	CONCLUSION	83
 CHAPITRE 5 ADHÉRENCE DES RÉPARATIONS SUR SURFACES PRÉPARÉES		86
5.1	INTRODUCTION.....	86
5.2	MÉTHODOLOGIE.....	86
5.2.1	<i>Paramétrage topographique</i>	86
5.2.2	<i>Réparation des supports</i>	91
5.2.3	<i>Évaluation de l'adhérence des réparations</i>	92
5.2.4	<i>Caractérisation des matériaux</i>	94
5.3	PRÉSENTATION DES RÉSULTATS	94

5.3.1	<i>Rugosité de surface</i>	95
5.3.2	<i>Adhérence des réparations</i>	96
5.4	ANALYSE DES RÉSULTATS	98
5.4.1	<i>Endommagement du substrat et adhérence de la réparation</i>	98
5.4.2	<i>Rugosité de surface et adhérence de la réparation</i>	100
5.5	CONCLUSION	104
CHAPITRE 6 MODÉLISATION D'UN SYSTÈME DE RÉPARATION		106
6.1	INTRODUCTION	106
6.2	MÉTHODOLOGIE	106
6.2.1	<i>Paramètres de modélisation</i>	106
6.2.2	<i>Propriétés mécaniques des matériaux</i>	107
6.3	PRÉSENTATION DES RÉSULTATS	110
6.3.1	<i>Influence du profil de surface</i>	110
6.3.2	<i>Influence des propriétés mécaniques</i>	113
6.4	ANALYSE DES RÉSULTATS	113
6.5	CONCLUSION	115
CHAPITRE 7 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS		116
7.1	OBJECTIFS POURSUIVIS	116
7.2	RÉSULTATS PRINCIPAUX ET CONCLUSIONS	116
7.2.1	<i>Intégrité des surfaces préparées</i>	116
7.2.2	<i>Méthode de caractérisation quantitative</i>	116
7.2.3	<i>Adhérence des réparations sur surfaces préparées</i>	118
7.3	RECOMMANDATIONS	118
7.3.1	<i>Méthode de caractérisation quantitative</i>	119
7.3.2	<i>Préparation de surface</i>	119
7.3.3	<i>Rugosité de la surface préparée</i>	120
7.4	PERSPECTIVES DE RECHERCHE	120
ANNEXE A	.....	129
ANNEXE B	.....	133
ANNEXE C	.....	141
ANNEXE D	.....	158
ANNEXE E	.....	179

Liste des tableaux

Tableau 2.1 – Normes relatives à la cohésion du substrat [Courard et Bissonnette, 2004]..	16
Tableau 2.2 – Propriétés mécaniques des bétons simulés	25
Tableau 2.3 – Essais en laboratoire de l’effet de la profondeur de carottage sur l’adhérence mesurée.....	26
Tableau 3.1 – Observations des fissures pour les différentes préparations de surface	37
Tableau 3.2 – Cohésion des surfaces préparées selon le type de rupture à partir essais de cohésion en traction pour les deux séries d’essais.....	42
Tableau 3.3 – Résistance évaluée avec les essais de cohésion en traction et de traction par fendage.....	45
Tableau 3.4 – Quantité d’eau absorbée après 90 et 1200 secondes.....	47
Tableau 4.1 – Composition du béton projeté.....	52
Tableau 4.2 – Composition des bétons pour les dalles de béton coulé et les supports.....	53
Tableau 4.3 – Propriétés mécaniques des corps d’épreuves.....	56
Tableau 4.4 – Essais accélérés de cohésion pour les diverses combinaisons testées	58
Tableau 4.5 – Effet de la profondeur de forage sur la force d’arrachement	58
Tableau 4.6 – Résultats des tests menés selon les paramètres optimaux à déterminer.....	60
Tableau 4.7 – Résultats des mesures prises pour caractériser les cônes de rupture	61
Tableau 4.8 – Résistance en compression évaluée à partir d’essais de pull-out foré pour les deux bétons testés	62
Tableau 4.9 – Résultats de l’essai de cohésion en traction avec le béton C1	63
Tableau 4.10 – Essais accélérés de cohésion des faces préparées pour les trois supports....	65
Tableau 4.11 – Résultats des essais de cohésion en traction	66
Tableau 4.12 – Valeurs moyennes des paramètres évalués pour les cônes mesurés avec l’ancrage CH2	74
Tableau 4.13 – Résultats récapitulatifs des essais sur les dalles de béton coulé	76
Tableau 4.14 – Résultats récapitulatifs des essais réalisés sur les supports préparés	78

Tableau 4.15 – Probabilité d’obtenir une valeur inférieure ou égale à la valeur critique établie selon les paramètres μ et σ des essais combinés des surfaces NAT et SAB pour l’essai accéléré de cohésion	81
Tableau 4.16 – Probabilité d’obtenir une valeur inférieure ou égale à la valeur critique établie selon les paramètres μ et σ des essais combinés des surfaces NAT et SAB pour l’essai au marteau Schmidt	81
Tableau 5.1 – Propriétés des dispositifs de numérisation	87
Tableau 5.2 – Composition des bétons de réparation	91
Tableau 5.3 – Profondeur moyenne de carottage selon la préparation de surface.....	93
Tableau 5.4 – Propriétés mécaniques des bétons de réparation et de l’adhésif époxy	94
Tableau 5.5 – Valeur des paramètres d’état de surface évalués avec RugoID³	95
Tableau 5.6 – Résultats des essais d’adhérence selon le type de rupture pour la série 1	97
Tableau 5.7 – Résultats des essais d’adhérence selon le type de rupture pour la série 2	98
Tableau 6.1 – Propriétés de quatre bétons utilisés lors des expérimentations.....	109
Tableau 6.2 – Propriétés des bétons et de l’adhésif époxy composant les systèmes de	110
Tableau 6.3 – Caractéristiques des préparations de surface (champ court).....	110
Tableau 6.4 – Contraintes présentes à l’interface selon le profil considéré	114

Liste des figures

Figure 2.1 – Système de réparation à trois phases [selon Emmons et coll., 1994].....	6
Figure 2.2 – Interface entre un granulats et une pâte de ciment Portland hydratée [modifié de Perez, 2005; dans Courard, 1999].....	7
Figure 2.3 – Mécanismes d’adhésion mécanique [selon Emmons et coll., 1994].....	8
Figure 2.4 – Diagramme des efforts de compression pour deux bétons de module d’élasticité différents après une réparation [Bissonnette, 1996].....	12
Figure 2.5 – Effets possibles du retrait différentiel entre deux bétons [Saucier, 1990].....	13
Figure 2.6 – Essai pull-off	16
Figure 2.7 – Essai pull-out noyé [selon Bungey et Soutsos, 2001]	17
Figure 2.8 – Essai pull-out foré [selon Bungey et Soutsos, 2001].....	18
Figure 2.9 – Internal fracture [selon Bungey et Soutsos, 2001]	18
Figure 2.10 – Essai au marteau Schmidt.....	19
Figure 2.11 – Modèle des profils de surface de ICRI [Galecki et coll., 2001].....	20
Figure 2.12 – Peigne articulé [Silfwerbrand, 2000].....	21
Figure 2.13 – Évaluation des paramètres D_a et R.G. [selon Abu-Tair et coll., 2000]	22
Figure 2.14 – Profilomètre d’état de surface à contact [selon Tasong et coll., 1998]	22
Figure 2.15 – Moiré de projection [selon Perez, 2005; Aubouin et coll., 2001]	24
Figure 2.16 – Résultats des calculs par éléments finis de la distribution des contraintes de traction à l’interface en fonction de la profondeur de carottage dans le substrat [Austin et coll., 1995].....	25
Figure 2.17 – Distribution des contraintes à l’interface en fonction de β [selon Austin et coll., 1995].....	27
Figure 3.1 – Observations au microscope binoculaire.....	30
Figure 3.2 – Montage de l’essai d’absorption capillaire [modifié de Küntz et coll., 2003] .	32
Figure 3.3 – Collage d’une pastille sur une surface présentant une rugosité élevée	34
Figure 3.4 – Appareil portatif de chargement en traction.....	34
Figure 3.5 – Absorption capillaire selon la surface spécifique pour les échantillons de la préparation NAT	38

Figure 3.6 – Absorption capillaire selon la surface spécifique pour les échantillons de la préparation POL.....	38
Figure 3.7 – Absorption capillaire selon la surface spécifique pour les échantillons de la préparation SAB.....	39
Figure 3.8 – Absorption capillaire selon la surface spécifique pour les échantillons de la préparation SCA.....	39
Figure 3.9 – Absorption capillaire selon la surface spécifique pour les échantillons de la préparation HYD.....	40
Figure 3.10 – Absorption capillaire selon la surface spécifique pour les échantillons de la préparation MP7S.....	40
Figure 3.11 – Absorption capillaire selon la surface spécifique pour les échantillons de la préparation MP14S.....	41
Figure 3.12 – Absorption capillaire selon la surface spécifique pour les échantillons de la préparation MP21S.....	41
Figure 3.13 – Résultats des essais de cohésion en traction selon la méthode de préparation	43
Figure 3.14 – Influence de l’endommagement sur la cohésion des surfaces préparées	44
Figure 3.15 – Saut présent lors de l’acquisition des données de l’échantillon HYD1	49
Figure 4.1 – Dispositifs utilisés afin de réaliser les essais accélérés de cohésion	55
Figure 4.2 – Essais au marteau Schmidt	57
Figure 4.3 – Résistances moyennes en compression des dalles avec le marteau Schmidt ...	59
Figure 4.4 – Idéalisation du cône de rupture	61
Figure 4.5 – Surface de rupture type avec le béton C3	63
Figure 4.6 – Résistances de compression évaluées avec le marteau Schmidt	64
Figure 4.7 – Coefficient de variation des résistances en compression évaluées avec le	65
Figure 4.8 – Étude statistique du nombre d’essais à réaliser pour le marteau Schmidt.....	68
Figure 4.9 – Influence de la profondeur de forage sur la force d’arrachement avec les ancres CH2	69
Figure 4.10 – Évolution de la force d’attachement pour un ancrage MC1	71

Figure 4.11 – Influence du diamètre de la tige filetée et de la profondeur de forage sur les résultats obtenus avec l’essai accéléré de cohésion.....	72
Figure 4.12 – Surface de rupture prise en compte dans l’estimation des contraintes.....	73
Figure 4.13 – Essai accéléré de cohésion	75
Figure 4.14 – Distribution normale générale des essais accélérés de cohésion.....	82
Figure 4.15 – Schéma de la procédure d’essai pour évaluer la qualité de la préparation de surface à partir d’essais accélérés de cohésion et au marteau Schmidt	83
Figure 5.1 – Interface utilisateur de RugoID ³	87
Figure 5.2 – Décomposition d’un profil de surface	88
Figure 5.3 – Détermination de la ligne de référence.....	89
Figure 5.4 – Paramètres d’état de surface.....	90
Figure 5.5 – Représentation d’une surface géométrique et d’une surface spécifique	91
Figure 5.6 – Essai d’adhérence entre un matériau de réparation et un substrat en béton	93
Figure 5.7 – Ruptures cohésives	96
Figure 5.8 – Ruptures adhésives	96
Figure 5.9 – Résultats des essais d’adhérence des deux séries d’essais pour les diverses préparations de surface	99
Figure 5.10 – Influence de l’endommagement du substrat sur l’adhérence de la réparation pour les surfaces préparées de la série 1	100
Figure 5.11 – Représentation schématique obtenue des surfaces par les méthodes de préparation de la série 2 [adapté de Perez, 2005]	101
Figure 5.12 – Adhérence selon le paramètre de rugosité R_a	102
Figure 5.13 – Adhérence selon le paramètre de rugosité $S_m/4$	102
Figure 6.1 – Maillage, géométrie et conditions aux limites.....	107
Figure 6.2 – Distribution des contraintes dans le système de réparation pour le profil plat	111
Figure 6.3 – Distribution des contraintes dans le système de réparation pour le profil SAB	111
Figure 6.4 – Distribution des contraintes dans le système de réparation pour le profil HYD	112

Figure 6.5 – Distribution des contraintes dans le système de réparation pour le profil MP21S.....	112
Figure 6.6 – Distribution des contraintes avec l’adhésif époxy sur le substrat en béton caractérisé par le profil HYD	113

Chapitre 1 Introduction

1.1 Mise en contexte

Le béton est un matériau de construction dont les propriétés à l'état frais et durci permettent son utilisation dans diverses circonstances. Toutefois, dépendant de la qualité de la mise en place du béton et des conditions environnantes, il arrive parfois que les propriétés mécaniques du béton soient plus faibles que celles désirées. Les sollicitations auxquelles le béton est soumis peuvent alors entraîner le vieillissement prématuré de certaines structures. À preuve, au printemps 1998, le Centre d'Expertise et de Recherche en Infrastructures Urbaines faisait état qu'environ 38% des ouvrages d'art avaient besoin d'être réparés dans la région métropolitaine de Montréal, pour un montant annuel de 4,9 millions de dollars, sans compter les 2,4 millions de dollars nécessaires pour le remplacement de certaines structures [Machabée, 2001].

Afin d'atteindre ou d'allonger la vie utile des structures en béton, une ou plusieurs interventions doivent être réalisées dans bien des cas. Certaines structures doivent parfois être rebâties lorsque l'endommagement est trop sévère. Règle générale, l'évaluation de la structure débute par une inspection visuelle pendant laquelle les défauts de surface, la présence d'agents agressifs ou de pathologies telle la RAG peuvent être décelés. Toutefois, l'inspection visuelle ne donne qu'un indice de la gravité de la détérioration de l'élément. Depuis les 30 dernières années, les développements technologiques ont donné lieu à l'élaboration de plusieurs appareils commerciaux permettant l'évaluation des ouvrages en béton [Bungey et Soutsos, 2001]. Il existe des méthodes d'évaluation non destructives, ne portant aucune atteinte à la structure, ou destructives. Une combinaison des méthodes destructives et non destructives est parfois utilisée. Il est alors possible d'avoir une expertise in situ plus générale et approfondie de l'état des structures et de déterminer les endroits critiques devant être réparés.

1.2 Problématique

Lorsqu'un élément endommagé doit être réparé, diverses méthodes de préparations de surface peuvent être utilisées pour enlever le béton détérioré : le marteau pneumatique, l'hydrodémolition, la scarification, etc. Plusieurs études soulignent qu'un endommagement de la surface préparée peut être induit avec certaines préparations de surface (voir section 2.2.1), réduisant ainsi l'adhérence subséquente des réparations. Toutefois, malgré tous les travaux qui ont été réalisés à propos des préparations de surface, il n'y a aucune méthode à l'heure actuelle qui permet de quantifier l'intégrité d'une surface préparée avant la mise en place de la nouvelle chape de béton.

1.3 Objectifs et description du projet

L'objectif principal de ce projet est de développer et valider une technique permettant de quantifier l'intégrité d'une surface en béton préparée avant la mise en place d'une réparation mince sur cette dernière. À cet objectif principal s'ajoutent les objectifs spécifiques suivants :

- Quantifier l'effet des méthodes de préparation courantes sur l'intégrité d'une surface en béton;
- Établir, s'il y a lieu, la corrélation entre la rugosité de la surface préparée et l'adhérence d'une réparation;
- Émettre des recommandations quant à des critères d'acceptation relatifs à la préparation de surface et à l'adhésion d'une réparation.

Afin de répondre aux objectifs précédents, le programme expérimental a été divisé en trois principaux volets. Le premier volet a porté sur l'évaluation de l'intégrité de surfaces en béton préparées avec différentes méthodes de préparation. Dans un premier temps, des observations au microscope binoculaire et des essais d'absorption capillaire ont été réalisés. Ils ont permis respectivement de quantifier l'endommagement des surfaces et de déterminer

si la porosité en surface peut être influencée par la méthode de préparation. Dans un second temps, la résistance mécanique des surfaces préparées a été évaluée par des essais de cohésion en traction, qui consistent en des essais d'arrachement (« pull-off ») adaptés à des surfaces irrégulières. Les méthodes de préparation employées sont le polissage, le jet de sable, la scarification, le jet d'eau (hydrodémolition) et le marteau pneumatique.

L'essai de cohésion en traction adapté dans le présent projet à des surfaces irrégulières permet d'évaluer la résistance d'une surface préparée. Toutefois, les précautions nécessaires pour réaliser convenablement l'essai et le temps requis pour coller les pastilles métalliques représentent des inconvénients majeurs sur chantier. De plus, l'essai de cohésion en traction est limité pour l'instant à des surfaces horizontales. Le second volet a donc consisté à développer et valider une nouvelle méthode d'évaluation quantitative des surfaces préparées facile à mettre en œuvre, applicable peu importe l'orientation de la surface et réalisable sur une courte période de temps. Afin de pouvoir valider l'essai développé, trois autres méthodes d'évaluation, dont l'essai de cohésion en traction, ont également été employées. Il est à noter que la nouvelle méthode se doit d'être utilisable tant sur des surfaces horizontales, que sur des surfaces verticales ou surplombantes.

Le troisième et dernier volet expérimental traite de l'influence de l'état du substrat (endommagement et rugosité) sur l'adhérence de la réparation. Il vise notamment à vérifier s'il existe une corrélation entre la rugosité de surface et l'adhérence de la réparation. Les mêmes surfaces préparées que celles utilisées au premier volet expérimental ont été retenues pour caractériser la rugosité de différentes surfaces. Suite à la réparation des surfaces, des essais d'adhérence ont été réalisés. Une modélisation de l'essai d'adhérence a également été effectuée afin de vérifier de quelle manière la rugosité de surface influence les contraintes présentes à l'interface du système de réparation.

1.4 Structure du document

Dans un premier temps, le Chapitre 2 présente une revue de la documentation scientifique. La définition d'un système de réparation, la caractérisation de la microstructure et les mécanismes d'adhésion qui caractérisent la zone de transition entre le substrat et le matériau de réparation y sont d'abord explicités. Ensuite, les divers paramètres qui influencent l'adhérence des réparations sont présentés. L'objectif principal du projet étant de développer une méthode de caractérisation quantitative du béton in situ, la revue de documentation évoque également les principales méthodes d'évaluation existantes. Par la suite, un sommaire des méthodes permettant la quantification de la rugosité de surface est présenté. La revue de documentation se termine par un résumé des études qui ont porté sur la modélisation de l'essai d'adhérence.

Le premier volet du programme expérimental, exposé au Chapitre 3, traite de l'effet des méthodes de préparation de surface sur l'intégrité des surfaces préparées et vise également à valider l'essai de cohésion en traction. Le Chapitre 4 présente par la suite les résultats du second volet expérimental qui ont conduit au développement d'une nouvelle méthode d'évaluation quantitative des surfaces préparées, soit l'essai accéléré de cohésion. Pour sa part, le troisième volet du programme expérimental est divisé en deux chapitres. D'une part, le Chapitre 5 expose les résultats expérimentaux de l'étude de l'adhérence des réparations. D'autre part, les calculs par éléments finis, relatifs à l'influence de la rugosité de surface sur les contraintes à l'interface lors de l'essai d'adhérence, sont exposés au Chapitre 6. Puis, le Chapitre 7 présente les conclusions majeures du projet ainsi que les recommandations quant aux choix des méthodes de préparation et de caractérisation quantitative des surfaces préparées. Quelques perspectives de recherche sont finalement proposées.

Chapitre 2 Revue de la documentation

2.1 Système de réparation

2.1.1 Définition

La réparation d'un élément en béton fait généralement intervenir deux matériaux très différents. D'une part, il y a le substrat, qui date normalement de plusieurs années et qui est considéré stable du point de vue volumétrique. D'autre part, il y a le matériau d'apport ou de réparation qui subira d'importants changements volumétriques au cours de ses premières années d'exposition à l'air libre. Deux types de réparation peuvent être effectués: une reconstruction partielle ou une réparation mince. Dans le premier cas, l'état de la structure est tel que ses capacités sont réduites et elle n'est plus sécuritaire. Une partie importante de béton, qui est détérioré, doit alors être enlevée. La reconstruction partielle peut exiger l'utilisation d'étais afin de pouvoir enlever le béton de façon sécuritaire et des barres d'armatures sont ajoutées dans la partie reconstruite. Dans le second cas, la réparation se limite à enlever le béton détérioré sur une profondeur de quelques millimètres, soit entre 25 et 100 mm, et à le remplacer par un nouveau béton, avec ou sans ajout d'armature, afin de retrouver l'aspect esthétique de la structure d'origine [Saucier, 1990].

Les propriétés mécaniques du matériau de réparation et du substrat peuvent également être différentes. Pour ces raisons, certains chercheurs, dont Emmons et coll. [1994], considèrent que le système de réparation constitue un composite dont la résistance de l'interface est fonction des propriétés du substrat, du matériau de réparation et de la préparation de surface. Les facteurs environnementaux, comme la température, jouent également un rôle important dans la qualité de l'interface. Tous ces éléments font en sorte que l'interface représente au niveau microscopique une zone de transition entre les deux phases du système de réparation, caractérisée par une porosité plus élevée que la matrice de pâte de ciment. Ainsi, plutôt que de parler d'un système à deux phases, Emmons et coll. [1994] préfèrent plutôt considérer un système composé de trois phases. La performance à long

terme de ce système est gouvernée par les propriétés du matériau de réparation, de la zone de transition et du substrat, tel que schématisé sur la figure 2.1.

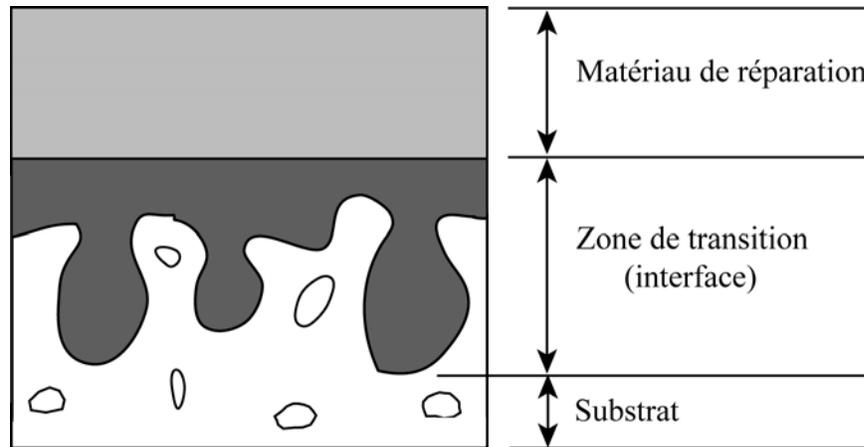


Figure 2.1 – Système de réparation à trois phases [selon Emmons et coll., 1994]

Puisque l'interface est potentiellement la zone de plus faible résistance, elle est responsable de la viabilité du système de réparation. L'intensité de l'adhésion entre la réparation et le substrat est caractérisée quantitativement par une mesure de l'adhérence, obtenue par la force ou l'énergie nécessaire pour séparer les deux composantes [Courard, 1999]. L'adhérence de la réparation dépend des mécanismes d'adhésion qui se développent dès les premières heures de la mise en place du matériau de réparation. Les mécanismes qui interviennent dans le cas de matériaux cimentaires sont présentés à la section 2.1.3. Plusieurs normes exigent des adhérences minimales et certaines recommandations dépendent du type de revêtement utilisé. La norme canadienne CAN/CSA A.23.2-6B [2001] recommande une adhérence minimale de 0,9 MPa dans le cas des bétons de réparation.

2.1.2 Microstructure de l'interface

Lors de la mise en place du matériau de réparation sur un substrat, ce dernier agit au même titre qu'une paroi et il y a relâchement du squelette granulaire, c'est l'effet de paroi [Desrosiers, 1999]. Une zone de transition (interface) caractérisée par une porosité plus importante que le matériau de réparation est alors formée [Saucier, 1990; Li et coll., 2001].

À une échelle plus petite, une situation similaire à l'effet de paroi est observable entre la pâte de ciment hydratée et le granulat dans un béton. En effet, une zone de transition, souvent appelée auréole de transition, sépare la pâte de ciment hydratée et le granulat, comme le montre la figure 2.2. Le développement de l'auréole de transition est engendré par des gradients de E/C qui conduisent au développement d'une structure relativement poreuse, où les ions peuvent plus facilement diffuser et permettre la formation de cristaux de portlandite et d'ettringite [Desrosiers, 1999]. Les cristaux y sont généralement plus gros et mieux formés [Courard, 1999]. Toutefois, d'après les travaux de Saucier [1990] et Li et coll. [2001], la microstructure de la zone de transition dans un système de réparation est moins complexe puisque le film C-H est absent.

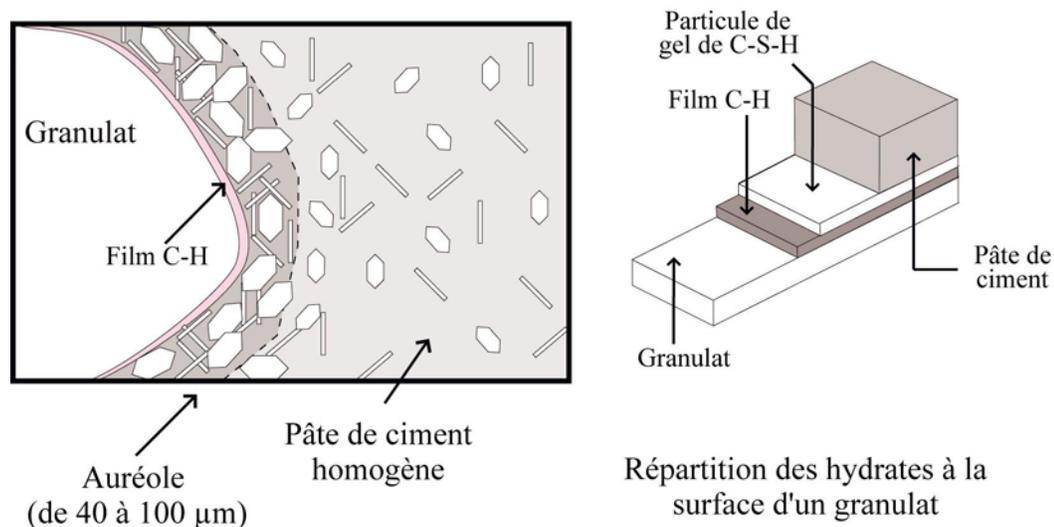


Figure 2.2 – Interface entre un granulat et une pâte de ciment Portland hydratée [modifié de Perez, 2005; dans Courard, 1999]

2.1.3 Mécanismes d'adhésion

Dans le cadre général du collage, l'observation du comportement de matériaux non poreux a permis d'énoncer plusieurs théories qui mettent à jour les forces en jeu [Courard, 1999]. Les mécanismes d'adhésion qui en découlent se regroupent sous deux principales catégories : l'adhésion mécanique et l'adhésion spécifique. La seconde catégorie comprend les forces intermoléculaires, la thermodynamique et les liaisons chimiques.

2.1.3.1 Adhésion mécanique

L'adhésion mécanique repose sur la pénétration du matériau de réparation (phase liquide) dans les aspérités ou les pores de taille suffisante du substrat (phase solide) et agit comme adhésif par la formation d'ancrages mécaniques après maturation. Au niveau macroscopique, les irrégularités de la surface du substrat, qu'elles soient naturelles ou créées par une préparation de surface, permettent à l'interface de résister à des efforts de traction et de cisaillement (voir figure 2.3). Emmons et coll. [1994] définissent ce mécanisme de blocage sous le nom de « mechanical interlocking », soit l'interpénétration mécanique. Plus la rugosité de la surface est complexe, meilleur sera le potentiel d'interpénétration étant donné l'augmentation de sites potentiels d'interaction. L'interpénétration mécanique ne peut toutefois pas expliquer certaines adhésions élevées obtenues sur des plaques de verre dépourvues d'une porosité [Courard, 1999]. D'autres mécanismes d'adhésion entrent donc en jeu, soit les mécanismes d'adhésion spécifique.

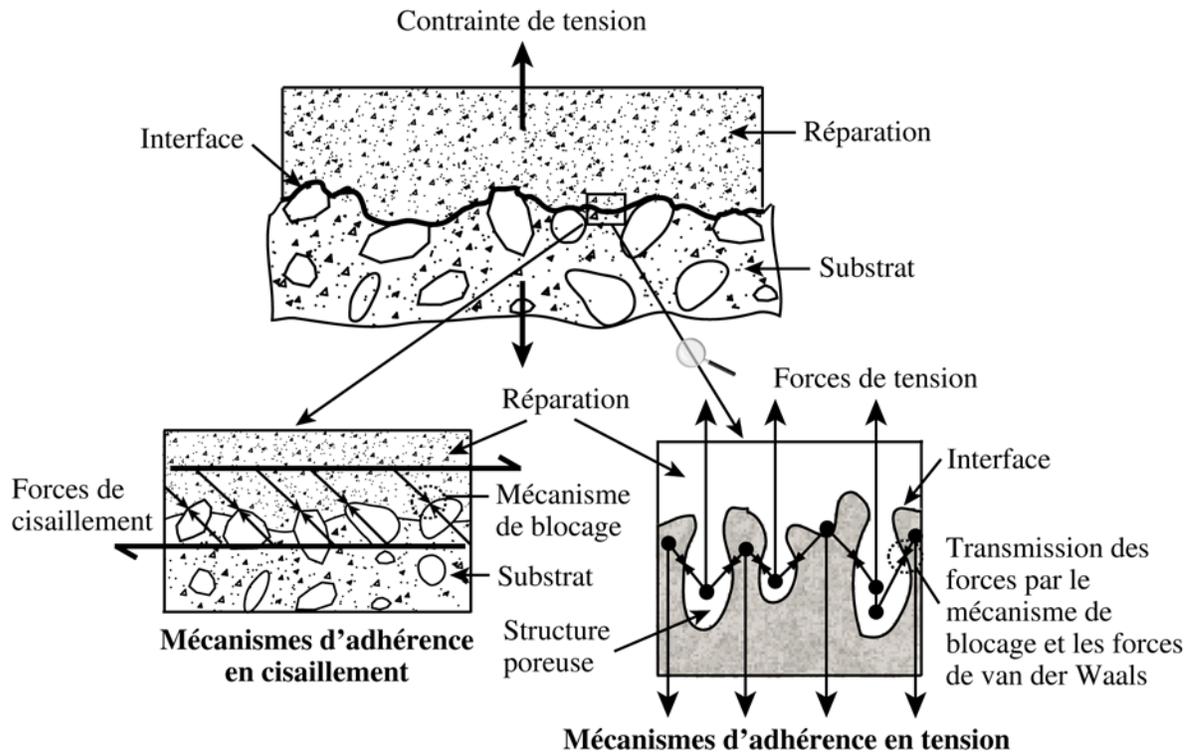


Figure 2.3 – Mécanismes d'adhésion mécanique [selon Emmons et coll., 1994]

2.1.3.2 Adhésion spécifique

L'adhésion spécifique regroupe les mécanismes qui dépendent de la surface spécifique disponible, soit la somme des surfaces de contact individuelles [Courard, 1999]. Il y a les interactions moléculaires, basées sur le principe que le lien entre deux phases distinctes provient de forces intermoléculaires et interatomiques, leur effet résultant d'attractions électriques. Les forces de Van der Waals (voir figure 2.3) et les liaisons par pont d'hydrogène sont les deux catégories d'interactions moléculaires fondamentales. Il existe également les aspects thermodynamiques de l'adhésion qui reposent sur les énergies des phases en jeu lors de la réparation d'un élément en béton. La tension interfaciale, la mouillabilité et l'adsorption du substrat ainsi que l'hystérésis de l'angle de contact entre la surface des phases en jeu (solide, liquide et/ou gazeuse) sont les trois aspects entourant la notion de la thermodynamique. Le dernier mécanisme fait appel à des liaisons chimiques qui impliquent des énergies 10 à 100 fois plus grandes que les liaisons Van der Waals [Couvrat, 1992]. Toutefois, il est moins certain que ces liaisons soient présentes à l'interface d'un système de réparation en béton puisqu'elles impliquent de véritables réactions chimiques.

2.2 Paramètres influençant l'adhérence

Plusieurs études ont été réalisées afin d'évaluer les paramètres qui peuvent intervenir et influencer l'adhérence des réparations. Cette partie de la revue de la documentation présente un bref résumé de ces études.

2.2.1 Rugosité et intégrité du substrat

Une préparation de surface est réalisée afin d'enlever le béton détérioré et nettoyer la surface sur laquelle le matériau de réparation sera coulé. La préparation doit être effectuée avec minutie puisque le lien entre le substrat et le matériau de réparation en dépend. Il existe plusieurs méthodes qui permettent d'effectuer la préparation de surface : le marteau pneumatique, la projection de particules (billes d'acier ou sable), le jet d'eau sous pression (hydrodémolition), etc. Le choix de la méthode dépend non seulement de l'importance des

travaux de préparation de la surface et de la texture désirée, mais également du type d'élément en béton à réhabiliter (surfaces verticales, surplombantes...) et des conditions en chantier. La préparation procurera à la surface une rugosité qui peut varier de quelques millimètres à plus d'une dizaine.

Felt est l'un des premiers chercheurs à avoir réalisé des études concernant l'influence de la préparation de surface sur l'adhérence des réparations en béton. Dans un rapport publié en 1956, Felt y présente des résultats d'essais d'adhérence en cisaillement qui semblent démontrer une légère influence de la rugosité de surface du substrat. En effet, ces résultats démontrent que l'utilisation d'un marteau-piqueur permet d'obtenir une surface pour laquelle l'adhérence en cisaillement est supérieure à une surface préparée au jet de sable. Toutefois, les meilleurs résultats ont été obtenus en utilisant une préparation à l'acide muriatique (27,9% de HCl), cette dernière procurant une surface moins rugueuse que les deux méthodes de préparation précédentes. Selon Felt [1956], ces divergences peuvent être attribuables à l'arrondissement des angles de la surface dans le cas du jet de sable et à l'endommagement du substrat par le marteau-piqueur. Il en conclut que la rugosité de surface a un rôle beaucoup moins important dans l'obtention d'une bonne adhérence comparativement aux deux facteurs suivants : (1) la résistance et l'intégrité du substrat et (2) la propreté de la surface de celui-ci.

Silfwerbrand [1990] a également observé l'influence de l'intégrité du substrat dans un système de réparation. Pour deux préparations procurant des rugosités similaires, soit l'hydrodémolition et le marteau pneumatique, il a obtenu des adhérences en traction plus élevées avec la première, la seconde entraînant des fissures dans le substrat. Hindo [1990] et Silfwerbrand [1990] ont également constaté la diminution de la quantité de microfissures engendrées par la méthode de préparation en utilisant le jet de sable. D'après les observations de Hindo [1990], la zone endommagée peut s'étendre jusqu'à une profondeur d'environ 9 mm à partir de la surface préparée dans le cas de marteaux pneumatiques. Les ruptures sont également survenues plus souvent à l'interface pour le marteau pneumatique, soit dans 31% des cas comparativement à 7% pour l'hydrodémolition.

Silfwerbrand [1990] a également remarqué que l'adhérence des réparations semble être influencée par la rugosité de la surface. Des surfaces sablées ont offert une meilleure adhérence que les surfaces hydrodémolies, alors que leur rugosité était plus faible. Les surfaces sablées ont démontré cependant un pourcentage de rupture à l'interface plus élevé.

Contrairement à ce que Felt et Silfwerbrand ont observé, Talbot et coll. [1994] ont noté qu'une bonne adhérence et durabilité de la réparation en traction sont obtenues avec des surfaces rugueuses. En effet, les essais de vieillissement accélérés ont démontré qu'entre deux et six mois, aucune perte significative d'adhérence en traction n'a été constatée pour des surfaces hydrodémolies ou préparées au marteau pneumatique suivi du jet de sable. Toutefois, une faible adhérence a été obtenue avec le marteau pneumatique employé seul. Pour leur part, les surfaces meulées et préparées au jet de sable ont présenté une perte de résistance avec le temps.

Selon certains chercheurs, l'adhérence de la réparation ne serait pas seulement attribuable à la rugosité et à la présence ou non de fissures sur la surface du substrat. Hindo [1990] avance que les adhérences élevées avec l'hydrodémolition seraient également attribuables à l'augmentation du pourcentage de micropores dans la pâte de ciment, accroissant ainsi la surface de contact. Wells et coll. [1999] soulignent également que la structure poreuse se doit d'être ouverte afin de permettre une pénétration suffisante du béton plastique et assurer un maximum de liens mécaniques.

2.2.2 Propriétés du matériau de réparation

Afin d'assurer une bonne adhérence ainsi que la durabilité de la réparation, la compatibilité entre la réparation et le substrat doit être assurée. Emberson et Mays [1990] ont établi des recommandations générales pour les matériaux de réparation sur substrat en béton. Les paragraphes qui suivent en présentent quelques-unes.

Dans un premier temps, Emberson et Mays suggèrent que le matériau de réparation possède des résistances en compression, traction et flexion qui excèdent celles du substrat. Règle

générale, cette recommandation est respectée pour la plupart des matériaux de réparation [Morgan, 1996]. Dans un second temps, ils recommandent que le matériau de réparation soit caractérisé par un module d'élasticité semblable à celui du substrat afin d'éviter la formation de concentrations de contraintes à l'interface. Cusson et Mailvaganam [1996], Lamontage et coll. [1995] ainsi que Morgan [1996] vont dans le même sens. Il est vrai qu'une sollicitation en flexion entraîne une discontinuité dans le profil des contraintes normales au niveau de l'interface. Toutefois, ce saut ne désigne pas une concentration de contraintes, mais d'une variation subite pour satisfaire à la compatibilité des déformations [Bissonnette, 1996]. De plus, selon Bissonnette [1996], une différence de rigidité entre les deux matériaux liés n'entraîne pas une augmentation du cisaillement au niveau de l'interface. Certes, un changement est observable dans le profil des contraintes de cisaillement, mais l'interface n'est pas sollicitée davantage.

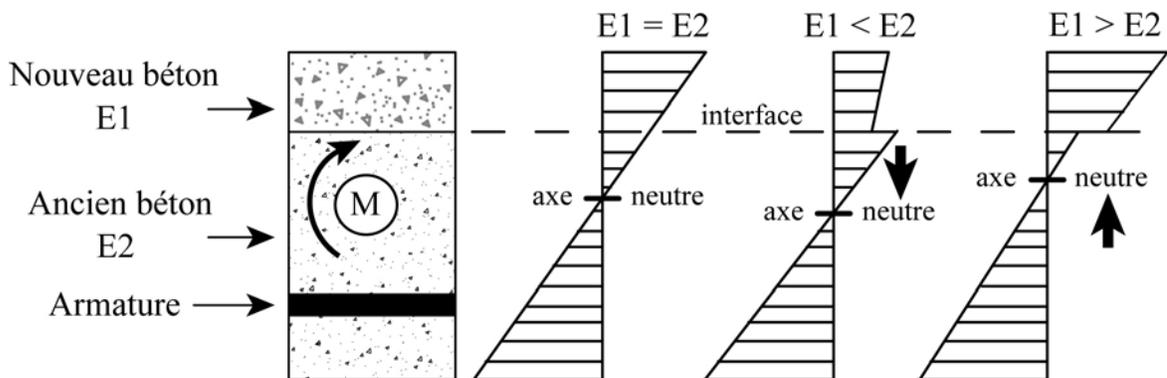


Figure 2.4 – Diagramme des efforts de compression pour deux bétons de module d'élasticité différents après une réparation [Bissonnette, 1996]

Toutefois, dépendant de la rigidité des deux matériaux, l'axe neutre ne sera pas situé au même endroit, une rigidité plus élevée de la réparation entraînant un axe neutre plus près de l'interface. Une partie plus importante des efforts est alors transmise à la réparation. En ce sens, il semble donc préférable d'avoir un module d'élasticité plus faible pour le matériau de réparation que celui du substrat. Il ne faut toutefois pas négliger la résistance en traction du béton. En effet, comme le mentionne Bissonnette [1996], ce n'est pas l'intensité absolue des contraintes qui est importante, mais bien le niveau de contrainte (rapport contrainte/résistance).

Le matériau de réparation doit également posséder un potentiel de retrait modéré, puisque le substrat restreint le développement du retrait, ainsi qu'un coefficient d'expansion thermique se rapprochant de celui du substrat. Si tel n'est pas le cas, alors des contraintes à l'interface pouvant largement dépasser la résistance en traction du matériau de réparation sont induites. Cette recommandation est d'ailleurs reprise par plusieurs chercheurs, dont Saucier [1990], Cusson et Mailvaganam [1996], Emmons et coll. [1994] et Bissonnette [1996]. La figure 2.5 schématise les divers problèmes qui peuvent survenir suite au retrait différentiel entre le matériau de réparation et le substrat.

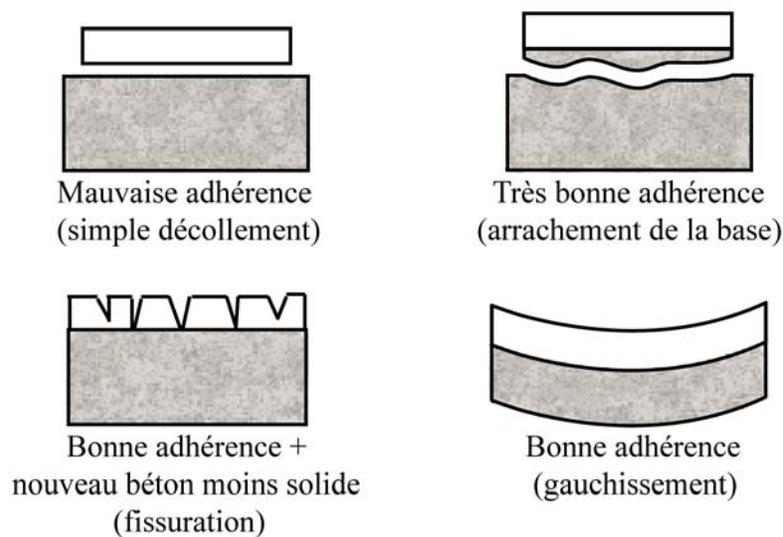


Figure 2.5 – Effets possibles du retrait différentiel entre deux bétons [Saucier, 1990]

Afin de s'adapter aux mouvements différentiels sans se fissurer ou se désolidariser, le matériau de réparation doit faire preuve d'une « déformabilité totale » suffisante. Cette déformabilité repose sur les trois termes présentés entre parenthèses dans l'équation 1 [Saucier, 1990], qui représente le bilan des déformations ($\Sigma\text{d}\epsilon$) dans un béton en cours de séchage en condition isotherme :

$$\Sigma d\epsilon_f = \epsilon_{retrait} - (\epsilon_{\text{élast}} + \epsilon_{\text{fluage}} + \epsilon_{\text{microfiss}}) \quad (1)$$

où :

$\epsilon_{retrait}$ = déformation du retrait;

$\epsilon_{\text{élast}}$ = déformation élastique;

ϵ_{fluage} = déformation différée par fluage;

$\epsilon_{\text{microfiss}}$ = déformation par microfissuration.

Les paragraphes précédents ont montré que bien des critères doivent être satisfaits pour permettre une bonne adhérence et une bonne durabilité de la réparation. Il semble difficile à première vue d'être en mesure de satisfaire à chacun d'eux. Toutefois, l'ensemble des travaux consultés soulignent que, peu importe le type de matériau de réparation et la composition de celui-ci, la grande majorité des réparations présentent un bon comportement à long terme [Emberson et Mays, 1990; Langlois et coll., 1994; Talbot et coll., 1994].

2.2.3 Mouillage préalable du substrat

Le substrat béton est un matériau qui est composé d'une série de pores et de capillaires qui sont susceptibles d'influencer l'adhérence. La grande majorité des travaux qui ont été réalisés sur l'aspect du mouillage préalable ou non du substrat tendent à démontrer qu'il est préférable que la surface soit légèrement humide, malgré l'absence de différence significative de la durabilité de l'adhérence entre une surface humidifiée ou non [Langlois et coll., 1994]. En effet, un substrat trop sec entraînerait un pompage excessif de l'eau venant du béton de réparation, créant une zone hétérogène et poreuse à l'interface [Silfwerbrand et Paulsson, 1998]. À l'opposé, un substrat saturé résulterait en un rapport E/C plus élevé à l'interface. Dans les deux cas, la résistance de l'interface s'en trouverait réduite. Les essais de diffraction aux rayons X de l'interface réalisés par Saucier [1990] ont également dénoter qu'un substrat saturé en eau empêche la pénétration des cristaux d'ettringite dans la porosité de celui-ci, diminuant ainsi l'adhérence de manière

significative dans certains cas. De meilleurs adhérences sont alors obtenus lorsque le substrat n'est pas saturé et que sa capacité d'absorption n'est pas trop élevée [Saucier et Pigeon, 1996]. Il s'agit alors d'un état saturé surface sèche (SSS).

2.3 Évaluation de la résistance du béton in situ

En laboratoire, des essais de compression et de fendage sont souvent réalisés afin de déterminer respectivement les résistances en compression et en traction du béton. Sur chantier toutefois, la réalisation de ces essais nécessite le prélèvement de carottes afin de les tester en laboratoire. Pour simplifier l'évaluation de ces propriétés, divers essais in situ, certains destructifs d'autres non, ont été développés au cours des dernières années. Dans le présent travail, des essais destructifs réalisés à l'aide d'appareils portatifs ont été effectués. Selon le cas, ces essais permettent d'évaluer soit la résistance du béton en place (cohésion), soit l'adhérence d'une réparation.

La cohésion traduit l'existence de forces particulières entre les macromolécules ou les molécules et explique les caractéristiques du produit final [Couvrat, 1990]. En fait, la cohésion d'un béton est directement liée à l'adhésion de la pâte de ciment sur le granulat ainsi qu'à l'enrobage du sable et des granulats par cette même pâte [Courard, 1999]. In situ, la cohésion du béton est le plus souvent évaluée par l'entremise d'essais d'arrachement : pull-off et pull-out.

2.3.1 Essai pull-off

L'essai pull-off permet de déterminer la résistance en traction du béton en appliquant un effort de tension sur une pastille métallique liée au béton par l'entremise d'un adhésif époxy. Tel que schématisé à la figure 2.6, la surface soumise à l'effort de traction peut être délimitée ou non par un carottage partiel. La norme BS 1881: partie 207 [1992] définit cet essai. Il est également possible maintenant de consulter la norme ASTM C1583 [2004] relative à cette méthode d'essai.

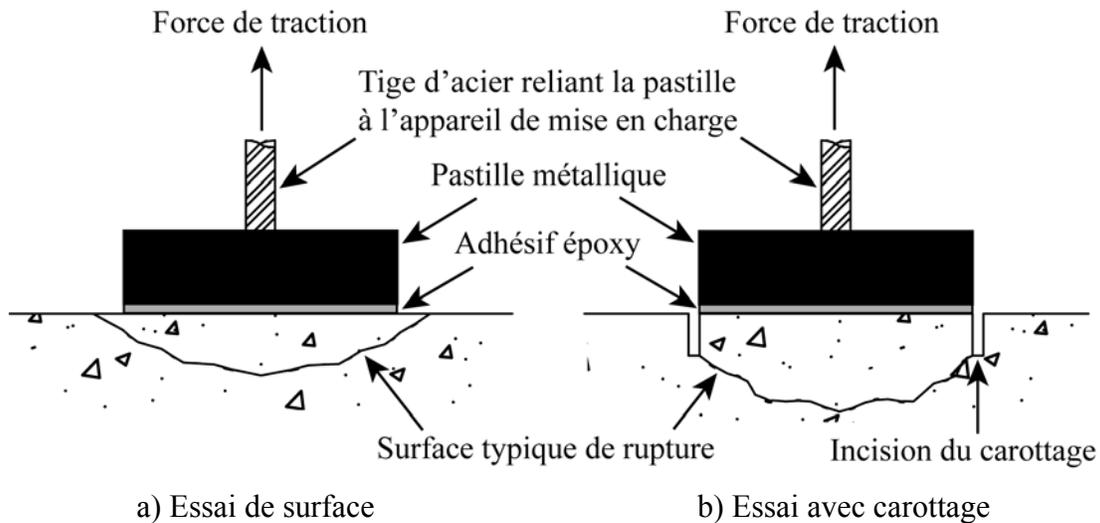


Figure 2.6 – Essai pull-off

Cette méthode peut également être utilisée afin d'évaluer l'adhérence en traction des réparations. Dans ce cas, le carottage doit atteindre le substrat jusqu'à une profondeur établie selon la norme utilisée. Par exemple, la norme canadienne exige un carottage minimal de 30 mm dans le substrat [CAB/CSA A23.2-6B, 2001], alors que la norme européenne prEN 1542 [1994] recommande au moins 15 mm. Certaines normes mentionnent des valeurs seuil de cohésion qui seraient caractéristiques d'une bonne adhérence de la réparation. Le tableau 2.1 présente un résumé de celles-ci.

Tableau 2.1 – Normes relatives à la cohésion du substrat [Courard et Bissonnette, 2004]

Normes	Prescriptions	
	Cohésion	Adhérence
G0007 [1995]	\geq adhérence	<ul style="list-style-type: none"> → 1,8 MPa (réparations non structurales) → 2,4 MPa (réparations structurales)
G0008 [1995]	\geq adhérence	<ul style="list-style-type: none"> → 1,3 MPa (revêtements LH et LHM) → 2,0 MPa (revêtements résineux)
	toujours \geq 1 MPa	
prEN 1766 [1995]	3,0 MPa (mélange MC 0,40)	
	2,5 MPa (mélange MC 0,45)	

Note : LH = liant hydraulique; LHM = liant hydraulique modifié; MC = mortier de ciment

2.3.2 Essai pull-out

Un essai pull-out consiste à arracher une pièce métallique ancrée dans un élément en béton. Une fois détachée, la pièce est composée d'un fragment de béton de forme conique. La force d'arrachement nécessaire pour retirer le cône de béton est ensuite corrélée à la résistance en compression du béton, obtenue expérimentalement. Il y a trois principales variantes pour ce type d'essai :

- *L'essai pull-out noyé* (« Lok-test ») qui utilise une tige d'acier composée d'une extrémité élargie noyée dans le béton frais. La force de traction maximale exercée sur celle-ci permet d'évaluer la résistance du béton et de déterminer, par exemple, le moment où il est possible de décoffrer et permettre la circulation des véhicules. Les normes ASTM C900 [1999] et BS 1881 : partie 207 [1992] définissent cet essai.

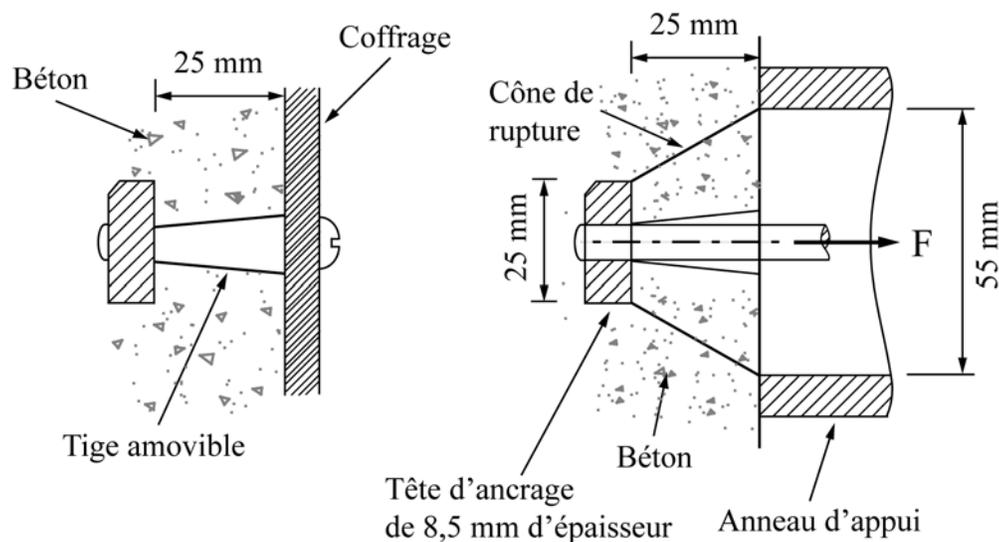


Figure 2.7 – Essai pull-out noyé [selon Bungey et Soutsos, 2001]

- *L'essai pull-out foré* (« Capo-test ») s'apparente à celui noyé, à la différence qu'il est réalisé sur un ouvrage en béton existant. La même surface de béton est sollicitée en insérant une tige d'acier dans un forage de 18,3 mm de diamètre. Toutefois, afin de confiner le béton, une rainure de 25 mm de diamètre est réalisée pour permettre l'expansion d'un anneau introduit sur la tige d'acier. L'expansion de l'anneau est

réalisée par l'application d'un couple de torsion et assure le confinement du béton. La figure 2.8 illustre cet essai. Les mêmes normes que celles de l'essai pull-out noyé régissent cet essai.

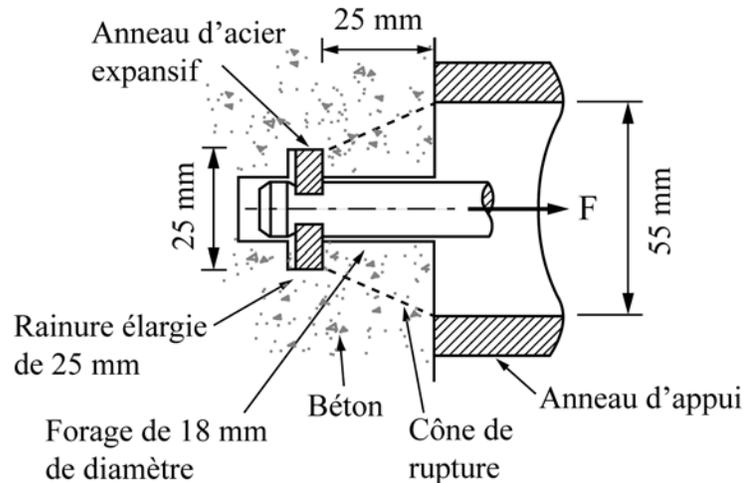


Figure 2.8 – Essai pull-out foré [selon Bungey et Soutsos, 2001]

- L'essai « **Internal fracture** » permet également d'évaluer le béton durci par l'entremise d'un ancrage expansif inséré à une profondeur de 20 mm, tel que représenté sur la figure 2.9 selon la norme britannique BS 1881 : Part 207 [1992]. Il présente l'avantage d'être réalisé rapidement et l'équipement nécessaire est peu coûteux. Toutefois, selon Bungey et Soutsos [2001], les résultats obtenus avec cet essai sont très variables.

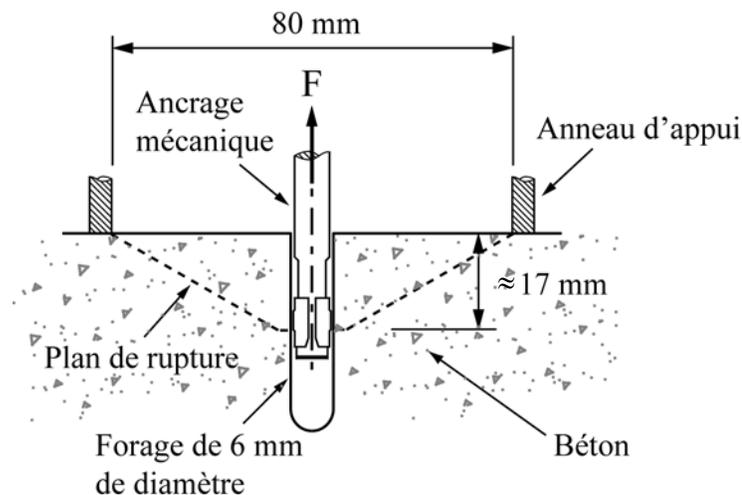


Figure 2.9 – Internal fracture [selon Bungey et Soutsos, 2001]

2.3.3 Essai au marteau Schmidt

L'essai au marteau Schmidt, ou essai au scléromètre, est également un essai qui permet d'évaluer la résistance du béton in situ. L'essai au marteau Schmidt évalue la résistance en compression du béton par le rebond d'une masse élastique (marteau). La masse, montée sur un ressort, « a une quantité potentielle fixe d'énergie qui lui est transmise par un ressort tendu à partir d'une position fixe, ce que l'on obtient en pressant la tête du marteau contre la surface du béton mis à l'essai » [Neville, 2000]. Une fois cette masse relâchée, elle rebondit depuis la tête, qui est toujours en contact avec la surface, et un indice de rebondissement indiqué par un curseur le long d'une règle graduée est obtenu. La calibration de l'appareil permet de corréliser cet indice à la résistance en compression du béton. La figure 2.10 permet de visualiser cet appareil.



Figure 2.10 – Essai au marteau Schmidt

Malgré le fait que l'essai au marteau Schmidt est très simple à réaliser, il présente plusieurs inconvénients. Dans un premier temps, il est sensible aux variations locales dans le béton. Par exemple, si la tête du marteau est appuyée sur un granulat, l'indice de rebondissement sera plus élevé que s'il est situé sur un vide. Dans un second temps, la tête du marteau doit toujours être perpendiculaire à la surface du béton, ce qui n'est pas facilement réalisable. De plus, la position du marteau par rapport à la verticale influencera l'indice de rebondissement, la gravité agissant sur le déplacement de la masse du marteau [Neville, 2000].

2.4 Évaluation de la rugosité de surface

Dans le domaine de la réparation des structures, le seul outil recommandé et régulièrement utilisé afin de déterminer la qualité d'une surface préparée est celui produit par *l'International Concrete Repair Institute (ICRI)*. Il s'agit de déterminer à quel modèle de profils de surface, numérotés de 1 à 9 dans l'ordre croissant de la rugosité, correspond la surface. Ces profils sont présentés à la figure 2.11.

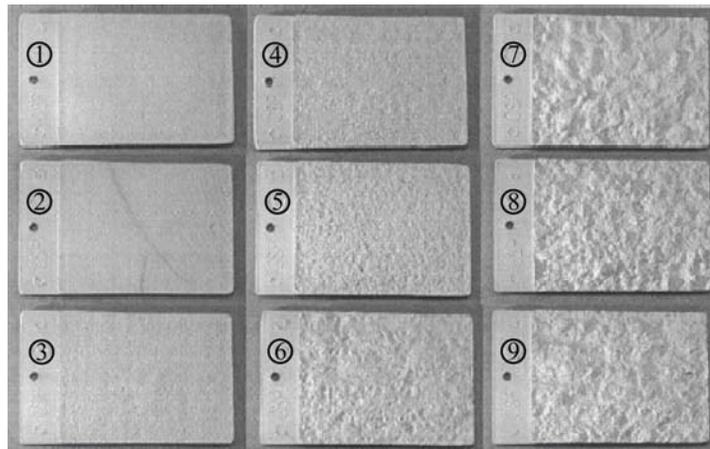


Figure 2.11 – Modèle des profils de surface de ICRI [Galecki et coll., 2001]

En pratique, il n'est pas toujours facile de déterminer à quel profil correspond une surface car la perception des formes de l'œil humain a ses limites. Il est donc préférable de recourir à des méthodes plus systématiques et plus objectives et qui permettent de caractériser, de manière quantitative, la rugosité d'une surface sans l'intervention du jugement humain. Cette section présente différentes méthodes qui caractérisent de manière quantitative la rugosité d'une surface.

2.4.1 Tache de sable

L'essai de la tache de sable consiste à étendre uniformément un volume fixe de sable normalisé sur la surface à évaluer, formant ainsi une tache de sable. Dans le projet de la norme européenne [CEN TC104, 1992], la rugosité des surfaces est classée selon l'indice de rugosité de surface (SRI), qui est obtenu en évaluant le diamètre moyen couvert par le

sable. Plus le SRI est élevé, plus la rugosité de surface est faible. Un SRI inférieur à 200 mm représente une surface rugueuse, alors qu'un SRI supérieur à 250 mm indique une faible rugosité. Réalisé selon la méthode du Centre de Recherches Routières [1969] de Bruxelles, la rugosité est obtenue en calculant le quotient du volume de sable par rapport à la surface occupée par celui-ci. La rugosité est alors représentée par le paramètre H, soit la hauteur moyenne de nivellement. L'essai de la tache de sable ne permet pas de déterminer des paramètres qui offrent une représentation 2D ou 3D de la rugosité. Des méthodes plus élaborées et plus rigoureuses ont alors été développées.

2.4.2 Peigne articulé

Silfwerbrand a mis au point une méthode qui lui a permis de distinguer les profils de surface engendrés par différentes préparations de surface au niveau macroscopique. Il s'agit d'un peigne articulé, composé d'aiguilles régulièrement espacées d'une valeur Δ , à partir duquel le profil moyen d'une surface peut être représenté en déterminant deux paramètres de rugosité. Il y a la longueur d'onde (λ), soit la distance moyenne entre deux irrégularités, et l'amplitude moyenne double ($2a$), qui est en fait la moyenne des hauteurs entre les pics et les creux successifs sur la longueur considérée (voir figure 2.12).

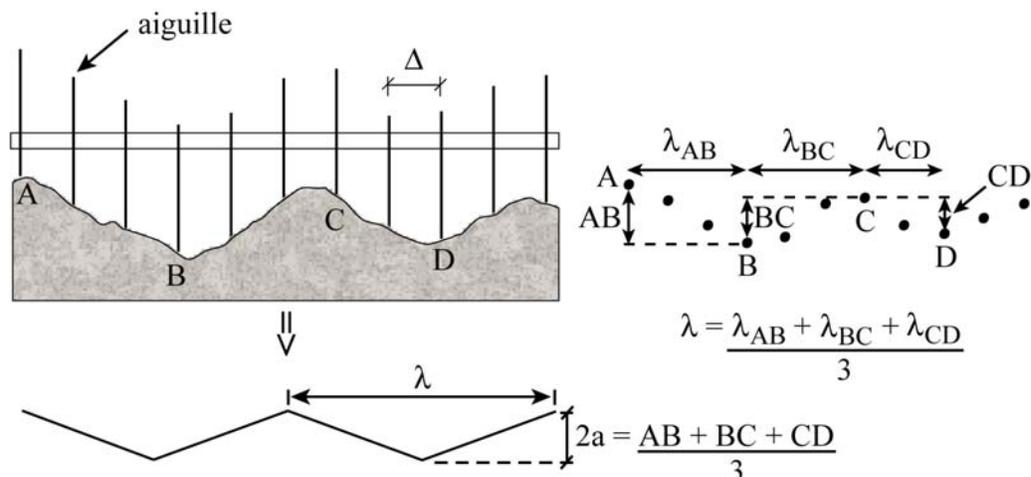
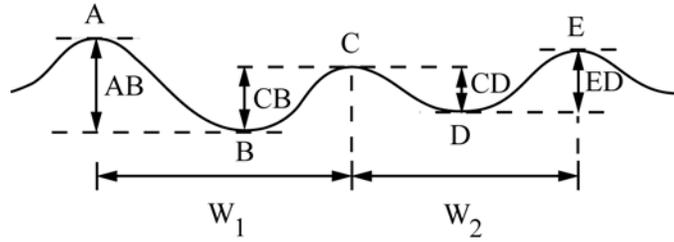


Figure 2.12 – Peigne articulé [Silfwerbrand, 2000]

Abu-Tair et coll. [2000] ont également utilisé cette technique, mais avec des aiguilles plus petites et plus rapprochées. De plus, ils ont proposé un paramètre de rugosité, appelé

« gradient de rugosité ($R.G.$) », qui représente la moyenne arithmétique des amplitudes moyennes doubles (D_a). La figure 2.13 présente les équations utilisées afin d'évaluer les paramètres D_a et $R.G.$



$$\Rightarrow D_a(W)_1 = \frac{(AB + CB)}{2} \quad \text{et} \quad R.G. = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |D_{a_i}|$$

Figure 2.13 – Évaluation des paramètres D_a et $R.G.$ [selon Abu-Tair et coll., 2000]

2.4.3 Profilomètre d'état de surface

L'appareil est caractérisé par une aiguille se déplaçant à une vitesse constante sur la surface et dont le déplacement vertical permet l'enregistrement du profil. Il est également constitué d'un conditionneur/amplificateur, d'une unité mécanique d'avancement, d'un calculateur et, selon le cas, d'enregistreurs (imprimantes, tables traçantes, etc.). La figure 2.14 permet de visualiser l'appareil.

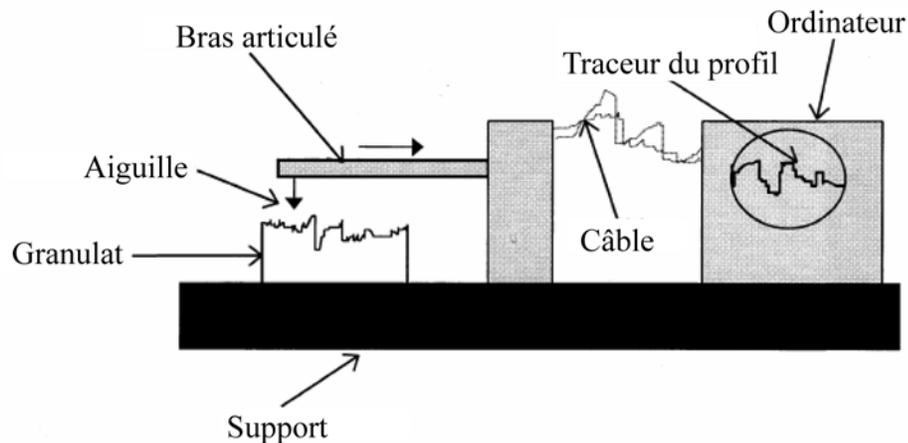


Figure 2.14 – Profilomètre d'état de surface à contact [selon Tasong et coll., 1998]

Malgré une précision verticale pouvant aller jusqu'à $10\ \mu\text{m}$ [Courard, 1999], le profilomètre d'état de surface présente plusieurs inconvénients. Par exemple, l'appareil utilisé par Courard [1999] ne permet pas d'enregistrer des amplitudes dépassant 1 mm. Les observations avec ce type d'appareil se limitent donc à des surfaces polies ou légèrement sablées. De plus, le temps nécessaire afin d'analyser une surface est directement relié au pas de mesure. Une augmentation du pas de mesure entraînera une réduction du temps d'analyse, mais la précision de cette analyse s'en trouvera affectée.

2.4.4 Triangulation laser

La triangulation laser consiste à projeter sur la surface de l'objet un faisceau (ou rayon) laser. La ligne de contact du faisceau avec la surface est captée par une caméra à dispositif de transfert de charge (DTC). Le déplacement de l'objet permet d'obtenir un profil de la surface dont la profondeur réelle est obtenue en évaluant la distance entre chaque point de contact du faisceau avec la surface et le plan de référence. Wu et coll. [2000] ont quantifié les surfaces de rupture de matériaux cimentaires en établissant deux paramètres de caractérisation, soient D et R_s , qui représentent respectivement la dimension fractale et l'indice de rugosité d'une surface. La précision de cette méthode est fonction de la largeur du faisceau laser et de la résolution de la caméra.

Maerz et coll. [2001] ont également fait appel à cette méthode afin de pouvoir contrôler la rugosité des surfaces et assurer un lien résistant et durable des laminés de polymères renforcés de fibres. Ils ont développé un appareil portable permettant des mesures tant en laboratoire que sur chantier et faisant appel au principe de projection d'ombre, l'image projetée étant composée de bandes rouges espacées. La rugosité de la surface est alors caractérisée par un paramètre i_A semblable au paramètre R_a utilisé par Courard [1999], soit l'écart arithmétique moyen du profil.

2.4.5 Moiré de projection

Le moiré de projection est une méthode optique dont le principe général consiste à projeter un réseau de franges (alternance de bandes ombragées et claires) sur la surface à

caractériser. Lorsque le réseau de franges rencontre la surface, il se déforme et l'image est alors captée par une caméra DTC. La géométrie de la surface est obtenue par le traitement des images numérisées. La figure 2.15 permet de visualiser le principe de cette méthode de caractérisation.

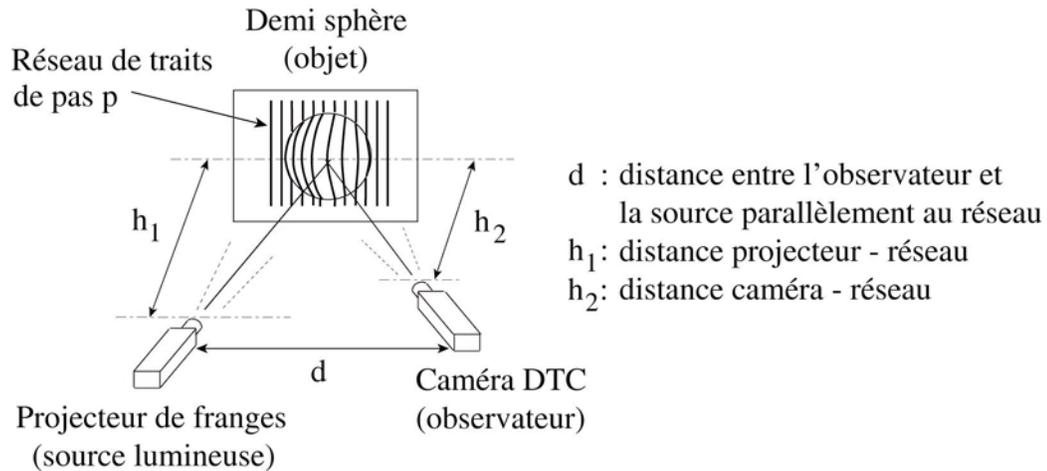


Figure 2.15 – Moiré de projection [selon Perez, 2005; Aubouin et coll., 2001]

La précision des mesures est grandement améliorée lorsque la procédure du décalage de phase est utilisée. Elle permet l'analyse du réseau de franges en transformant celui-ci en un champ de phases ϕ dont les images (au moins trois) sont déphasées les unes par rapport aux autres. La précision obtenue avec cette technique est d'environ $10 \mu\text{m}$ dans des conditions usuelles d'utilisation [Aubouin et coll., 2001]. La méthode du moiré de projection permet d'évaluer des surfaces présentant des amplitudes dépassant le millimètre, qui est la limite du profilomètre utilisé par Courard [1999].

2.5 Modélisation de l'essai d'adhérence par traction

Dans une étude conduite en 1995, Austin et coll. ont modélisé un système de réparation soumis à un essai pull-off avec l'appareil « Limpet ». Une analyse élastique a été considérée pour un matériau de réparation et un substrat caractérisés par les propriétés mécaniques présentées dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2 – Propriétés mécaniques des bétons simulés

Matériau	Module d'élasticité (MPa)	Coefficient de Poisson
Réparation	20000	0,13
Substrat	30000	0,20

La figure 2.16 permet de visualiser la distribution des contraintes de traction à l'interface du système de réparation pour trois profondeurs de carottage dans le substrat (d_s). Il est possible d'observer que les contraintes sont toujours plus élevées en périphérie qu'au centre de la carotte. De plus, les contraintes à la périphérie du carottage sont beaucoup plus élevées pour un d_s de 2 mm comparativement à un d_s de 10 ou 15 mm. Ces résultats indiquent donc qu'une diminution de la profondeur de carottage entraînera une distribution non uniforme des contraintes très importantes à l'interface. Ce déséquilibre provoquera donc une sous-évaluation de l'adhérence de la réparation.

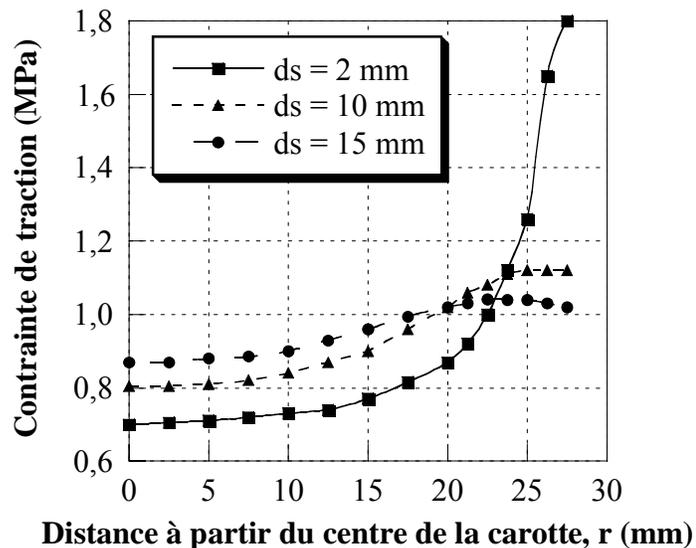


Figure 2.16 – Résultats des calculs par éléments finis de la distribution des contraintes de traction à l'interface en fonction de la profondeur de carottage dans le substrat [Austin et coll., 1995]

Austin et coll. [1995] ont également réalisé des essais en laboratoire afin de vérifier la validité des calculs par éléments finis. Les résultats de ces essais, présentés dans le tableau 2.3, démontrent que la contrainte de rupture pour un carottage de 2 mm dans le

substrat est environ 15 % plus faible que celle pour un carottage allant jusqu'à 15 mm dans le substrat, quel que soit le type de préparation de surface utilisé.

Tableau 2.3 – Essais en laboratoire de l'effet de la profondeur de carottage sur l'adhérence mesurée

Profondeur de carottage dans le substrat (d_s)	Adhérence moyenne (MPa)	
	Surface préparée au jet de sable	Surface préparée avec retardateur de prise
15 mm	2,94	2,06
2 mm	2,51	1,61

Vaysburd et McDonald [1999] ont également remarqué l'influence de la profondeur de carottage lors de l'évaluation de l'adhérence en traction de réparations. Les calculs par éléments finis ont porté sur trois différents matériaux de réparation de 75 mm d'épaisseur et des profondeurs de carottage de 13, 25 et 38 mm dans le substrat. Ils ont montré qu'un carottage peu profond dans le substrat entraîne des concentrations de contraintes significatives et sous-estime la résistance réelle de l'interface. Pour éviter la présence de contraintes élevées à l'interface, Vaysburd et McDonald concluent que la profondeur minimale de carottage sous l'interface doit être la valeur la plus élevée entre 25 mm ou la moitié du diamètre de la surface sollicitée. De plus, des différences ont été observées entre les calculs théoriques par éléments finis et les comportements sur le terrain. Ils attribuent de tels écarts principalement à cinq facteurs : la présence de défauts dans le système, le relâchement des contraintes causé par la déformation du matériau, la probabilité que la zone la plus faible ne corresponde pas à celle où les contraintes sont les plus élevées, la sensibilité relative de l'appareil de mesure au taux de chargement et la déviation par rapport à la normale de la surface [Vaysburd et McDonald, 1999].

Austin et coll. [1995] ont également réalisé des calculs par éléments finis, relativement à l'effet engendré par la divergence des propriétés des deux matériaux dans un système de réparation, dont le module d'élasticité et le coefficient de Poisson. Pour examiner l'influence de ces deux propriétés, ils ont défini un paramètre β :

$$\beta = \left(\frac{E_1}{\nu_1} \right) / \left(\frac{E_2}{\nu_2} \right) \quad (2)$$

En considérant ce paramètre, Austin et coll. ont observé que plus la valeur de ce paramètre est élevée, plus les contraintes de traction sont importantes en périphérie du carottage, comme il est possible de le constater sur la figure 2.17.

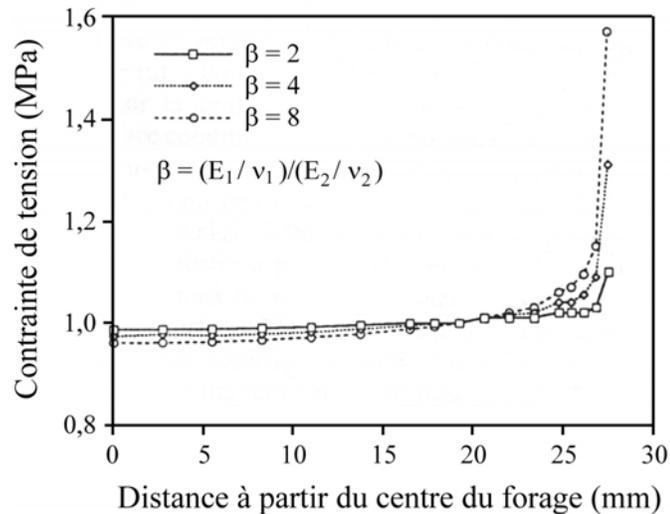


Figure 2.17 – Distribution des contraintes à l'interface en fonction de β [selon Austin et coll., 1995]

Ces résultats démontrent donc qu'il faut une différence importante des propriétés mécaniques des matériaux composant le système de réparation pour qu'il y ait une augmentation importante des contraintes à l'interface. Toutefois, il n'est pas dit qu'une divergence élevée entraînera automatiquement une mauvaise adhérence de la réparation. À preuve, malgré les grandes divergences entre les modules d'élasticité des matériaux utilisés afin de réaliser les essais de pull-off, soit les pastilles d'acier, l'adhésif époxy et le béton, le système peut générer des adhérences élevées.

2.6 Conclusion

La revue de documentation a permis de constater que plusieurs chercheurs ont étudié l'effet des méthodes de préparation de surface sur l'adhérence des réparations. En effet, tous les travaux notent l'importance de l'intégrité du substrat afin d'obtenir une bonne adhérence. Cependant, aucune étude n'a porté d'attention à l'évaluation de la résistance des surfaces suite à la préparation de la surface étant donné qu'aucune méthode de caractérisation n'est disponible, à l'exception de l'essai au marteau Schmidt. Neville [2000] ne recommande toutefois pas l'utilisation de cet essai sur un béton à texture ouverte (non lisse), puisque la propagation de l'onde s'en trouve affectée. De plus, les travaux effectués ne démontrent pas clairement le rôle de la rugosité de surface sur l'adhérence des réparations. Il apparaît donc essentiel de développer une méthode permettant d'évaluer la résistance des surfaces préparées afin d'évaluer son effet sur l'adhérence des réparations. La réalisation d'essais d'adhérence permettra également de vérifier si la rugosité de surface joue un rôle significatif sur la qualité du lien entre la réparation et le substrat.

Chapitre 3 Évaluation de l'intégrité des surfaces préparées

3.1 Introduction

Tel que mentionné dans la revue de documentation, diverses méthodes de préparation sont disponibles afin d'enlever le béton endommagé sur une structure existante. Toutefois, aucune étude ne s'est attardée à évaluer l'effet de ces méthodes sur la résistance résiduelle de la surface préparée. L'objectif principal de ce premier volet expérimental est de quantifier l'effet des méthodes de préparation de surface courantes sur l'intégrité d'une surface en béton.

3.2 Méthodologie

Afin de répondre à l'objectif mentionné auparavant, une évaluation physique de l'intégrité des surfaces préparées a d'abord été réalisée par l'entremise d'observations au microscope binoculaire et d'essais d'absorption capillaire. Par la suite, une évaluation mécanique des surfaces préparées a été réalisée par des essais de cohésion en traction afin d'évaluer l'influence de l'intégrité physique sur la résistance des surfaces préparées. La fiabilité et la reproductibilité de l'essai de cohésion en traction ont par le fait même été évalués. La description des corps d'épreuves ainsi que les méthodes de préparation qui ont été utilisées sont explicitées dans les paragraphes qui suivent. De plus, les procédures pour réaliser les observations au microscope binoculaire, les essais d'absorption capillaire et les essais de cohésion en traction y sont présentées.

3.2.1 Corps d'épreuves

Afin de réaliser les divers essais qu'englobe ce premier volet expérimental, neuf supports en béton d'environ 61 cm × 91 cm × 61 cm, fabriqués à l'hiver 2001, ont été utilisés. Deux séries de préparation de surface ont été réalisées sur les supports. Pour la première série d'essais (série 1), les préparations qui ont été réalisées sont les suivantes : polissage (POL), jet de sable (SAB), scarification (SCA), hydrodémolition (HYD) et marteau pneumatique

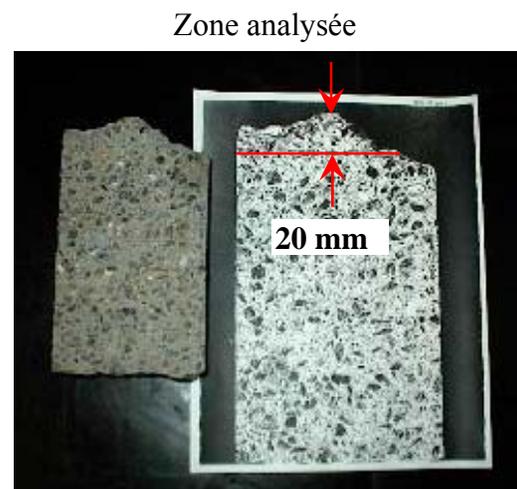
suivi d'un jet de sable (MPS). La scarification a été réalisée dans les deux directions, soit longitudinalement et transversalement, sur deux supports. Un support scarifié a été utilisé pour chacune des deux séries d'essais. Pour le marteau pneumatique, trois poids différents ont été utilisés, soit 7, 14 et 21 kg. Les préparations obtenues sont identifiées ainsi : MP7S, MP14S et MP21S. Une surface finie à la truelle (NAT) a également été utilisée comme témoin. Lors de la seconde série d'essais (série 2), les préparations ont été effectuées sur la face opposée à celle réparée sur les mêmes supports. Seules les préparations SAB, SCA, HYD, MP7 et MP14 ont été réalisées, sans passage du jet de sable pour les deux dernières préparations. La pression d'eau utilisée pour préparer les surfaces hydrodémolies était d'environ 100-130 MPa. Lors des essais de cohésion en traction, les supports étaient âgés d'environ 18 mois et 33 mois respectivement pour les essais de la série 1 et de la série 2.

3.2.2 Observations au microscope binoculaire

Les observations au microscope binoculaire ont été réalisées sur des plaques provenant de carottes de 100 mm de diamètre prélevées dans les supports préparés, sur une profondeur d'environ 150 mm, et sciées en deux. La figure 3.1 présente le microscope binoculaire utilisé et une plaque analysée.



a) Microscope binoculaire



b) Photocopie d'une plaque polie à 150%

Figure 3.1 – Observations au microscope binoculaire

Une carotte a été prélevée sur chacune des surfaces préparées à l'exception des surfaces préparées avec les marteaux pneumatiques. Pour ces dernières, deux carottes ont été extraites dont une comprenait généralement un creux correspondant à l'endroit où la pointe de l'appareil a frappé le béton. Ainsi, 4 plaques ont été observées pour les surfaces préparées aux marteaux pneumatiques, alors que 2 plaques ont été analysées pour les autres surfaces préparées. Une fois sciée, les plaques ont été polies. En moyenne, l'analyse des plaques s'est limitée aux 20 premiers millimètres à partir du point le plus élevé de la surface préparée (voir figure 3.1), l'observation d'une surface MP21S n'ayant montré aucune fissure au-delà de cette limite. Les fissures ont été reproduites sur une photocopie à 150% de la surface des plaques. Ensuite, des feuilles de plastique transparent ont été utilisées afin de reproduire les fissures et de pouvoir caractériser celles-ci (longueur, largeur, profondeur maximale et nombre). La largeur des fissures a été établie à l'aide d'une règle sur laquelle sont reproduits des traits d'épaisseur variant de $0,05 \mu\text{m}$ à $0,35 \mu\text{m}$. La profondeur maximale a été mesurée à partir du point le plus élevé de la surface préparée jusqu'à la fissure la plus profonde, parallèlement aux rebords de la plaque.

3.2.3 Essai d'absorption capillaire

Des essais d'absorption capillaire ont été réalisés afin de vérifier si la porosité de surface varie selon le type de préparation de surface et s'il est possible ainsi de détecter la présence éventuelle d'un endommagement. La succion capillaire est le phénomène de transport qui caractérise les mouvements d'eau à l'interface sur un substrat sec [Courard, 1999]. Selon Courard [1999], le système poreux d'un béton est composé de pores et de capillaires qui peuvent être classés par leur dimension comme suit:

- les macropores (défauts de compactage) : diamètre $> 20 \mu\text{m}$;
- les gros capillaires : $10 \mu\text{m} < \text{diamètre} \leq 20 \mu\text{m}$;
- les capillaires fins : $0,1 \mu\text{m} < \text{diamètre} \leq 10 \mu\text{m}$;
- les micropores : $0,01 \mu\text{m} < \text{diamètre} \leq 0,1 \mu\text{m}$;
- les pores de gel : diamètre $\leq 0,01 \mu\text{m}$.

Il existe également les pores de la zone de transition entre les granulats et la pâte de ciment hydratée qui peuvent présenter des dimensions variables. L'essai d'absorption capillaire permet d'évaluer la quantité d'eau absorbée par une surface sous l'effet de la remontée capillaire, qui met en jeu les deux types de pores capillaires.

Les essais ont été effectués sur des carottes de 50 mm de diamètre prélevées sur chacun des supports préparés (2 ou 3 carottes/support). Afin d'éliminer l'eau libre, les carottes ont été mises au four à 60°C pendant 48 heures. Toutes les surfaces, exceptée la surface préparée, ont été scellées avec un époxy afin de limiter la pénétration de l'eau à la surface préparée. Par la suite, les carottes ont été entreposées dans une salle à température et humidité contrôlées, respectivement de 23°C et 50% H.R. Avant de réaliser les essais, les carottes ont été à nouveau mises au four à 60°C jusqu'à ce que la masse de celles-ci soit constante, assurant un état hydrique semblable pour chacune d'elles. L'appareil utilisé pour réaliser ces essais est présenté à la figure 3.2.

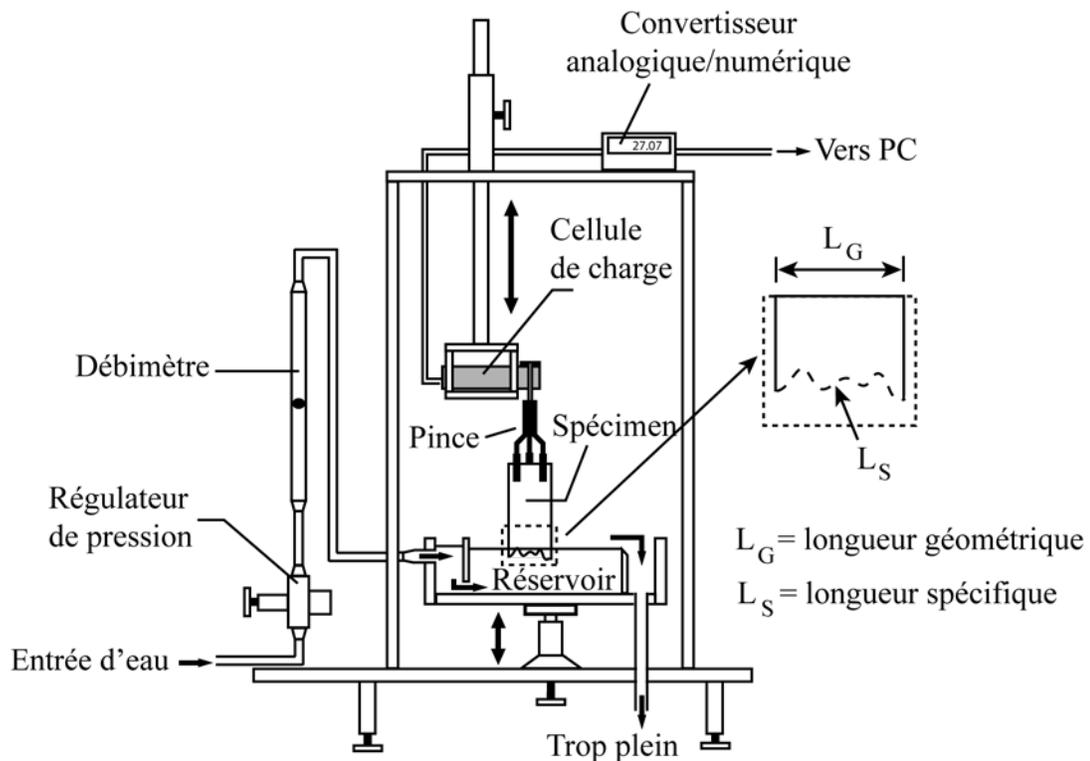


Figure 3.2 – Montage de l'essai d'absorption capillaire [modifié de Küntz et coll., 2003]

La principale caractéristique du montage est qu'il est doté d'une cellule de charge de 20 N qui permet de mesurer en continu le poids d'eau absorbée au 0,01 g près. Le niveau du réservoir d'eau est maintenu constant par l'approvisionnement continu et régulé d'eau. Le réservoir est supporté par un plateau qui permet le déplacement vertical de celui-ci et des pinces permettent de supporter les échantillons pendant l'essai. Le débitmètre assure un débit de 600 cm³/min, valeur largement supérieure au taux d'absorption de matériaux poreux comme le béton [Küntz et coll., 2003].

L'essai débute dès le contact entre l'eau et l'échantillon. Cependant, l'acquisition de la masse d'eau absorbée par ce dernier commence lorsque le plan d'eau intercepte 100% de la surface géométrique (S_G) de la carotte. La hauteur d'immersion de celle-ci varie donc selon la plus grande profondeur de creux créée par la préparation de surface. L'intervalle entre les mesures a été fixé à 1 seconde et les expérimentations ont été conduites pendant au moins deux heures.

3.2.4 Essai de cohésion en traction

L'essai de cohésion en traction a été utilisé afin d'évaluer la résistance mécanique des surfaces préparées. Il fonctionne sur le même principe qu'un essai pull-off (voir section 2.3.1). Une force d'arrachement en traction est transmise à une surface circulaire délimitée par un carottage d'une certaine profondeur via une pastille d'acier collée à cette surface. L'adhésif époxy utilisé pour coller les pastilles d'acier nécessite une période d'attente de 24 heures avant de réaliser un essai à 23°C. Dans le cadre de ce projet, certaines surfaces présentaient d'importantes irrégularités. L'adhésif époxy a donc également servi à combler ces irrégularités. Afin de confiner l'adhésif époxy, des tubes en carton ont été mis en place dans l'incision du carottage, comme il est possible de le visualiser sur la figure 3.3.

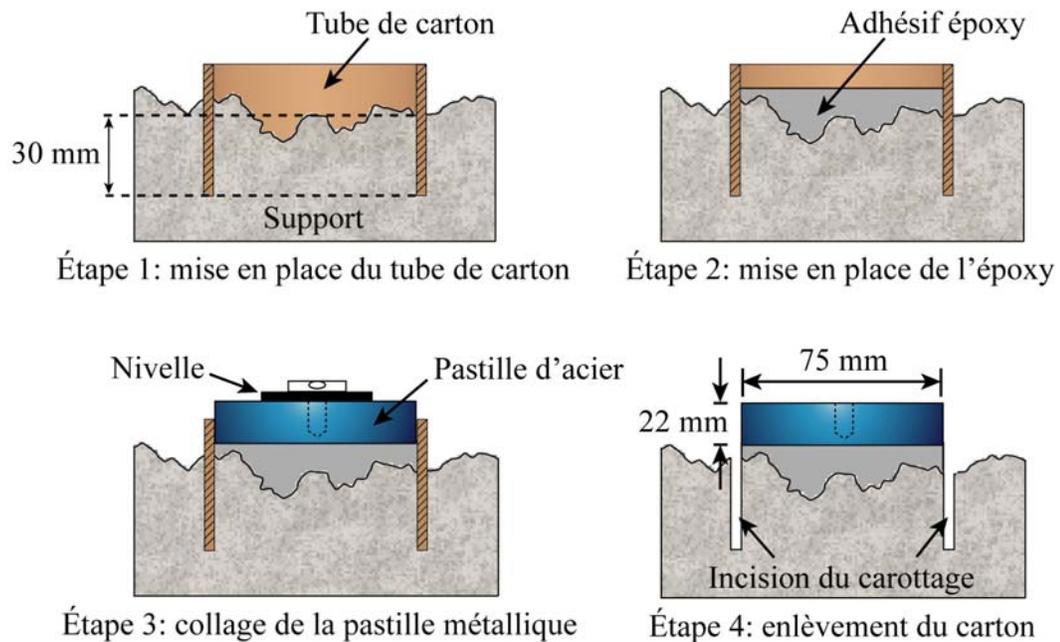


Figure 3.3 – Collage d'une pastille sur une surface présentant une rugosité élevée

À partir des essais réalisés par Courard et Bissonnette [2004], les carottages ont été effectués de sorte qu'une profondeur de 30 mm soit atteinte par rapport au point le plus bas de la surface délimitée par le carottage. Le chargement en traction des surfaces à évaluer a été réalisé à l'aide de l'appareil portatif présenté sur la figure 3.4.



Figure 3.4 – Appareil portatif de chargement en traction

Des pastilles d'acier de 75 mm de diamètre ont été utilisées afin de transmettre la force de traction à la zone de béton à évaluer. La procédure suivie pour réaliser les essais est la suivante :

- 1) Carottage du béton à la profondeur désirée à l'aide d'une carotteuse à l'eau;
- 2) Nettoyage de l'incision ainsi réalisée au jet d'eau;
- 3) Enlèvement de l'excédent d'eau avec un jet d'air comprimé et séchage à l'air libre pendant une période d'attente minimale de 24 heures avant le collage des pastilles;
- 4) Nettoyage à l'acétone de la surface de la pastille où l'adhésif époxy sera appliqué;
- 5) Collage de la pastille d'acier à l'aide de l'adhésif époxy en prenant bien soin qu'elle soit parallèle au plan du carottage;
- 6) Mise sous tension de la surface de béton à tester via la pastille métallique une fois la polymérisation de l'époxy complétée.

La norme canadienne CSA A23.2-6B [2001] impose un taux de chargement de 100 N/s, soit 0,02 MPa/s, pour un échantillon de 75 mm de diamètre, alors que cette valeur est de $0,05 \pm 0,01$ MPa/s dans le cas de la norme européenne prEN 1542 [1994]. Un taux de chargement de 0,05 MPa a été adopté puisqu'il était plus facile de conserver celui-ci, le taux de chargement étant régulé manuellement avec l'appareil portatif utilisé. Les espacements entre chaque carottage et ceux entre un carottage et le rebord de l'élément à caractériser ont été déterminés selon la norme britannique BS 1881 : Part 207 [1992].

3.2.5 Caractérisation des matériaux

Des essais sur les bétons frais et durcis ont été réalisés afin de caractériser les bétons utilisés. Pour les bétons frais, des essais d'affaissement au cône d'Abrams et de teneur en air ont été effectués respectivement selon les normes ASTM C143 [1999] et ASTM C231 [1999] quelques minutes après la fin de la séquence de malaxage. Dans le cas des bétons durcis, seule la résistance en compression à 28 jours a été évaluée selon la norme ASTM

C39 [1999]. Les essais ont été réalisés sur des cylindres vibrés de 100 mm × 200 mm, mûris dans un environnement à 23°C et 100 % H.R. jusqu'à l'échéance des essais. De plus, étant donné que ces supports ont été utilisés dans les volets subséquents, la résistance en compression [ASTM C39, 1999], la résistance en traction par fendage (essai « brésilien ») [ASTM C496, 1999] et le module d'élasticité [ASTM C496, 1999] ont été mesurés à partir de carottes prélevées sur les supports âgés d'un peu plus de 43 mois. Au total, 12 cylindres de 100 mm × 200 mm ont été extraits sur trois supports, soit quatre par support. L'Annexe A présente les résultats de ces essais de caractérisation.

3.3 Présentation des résultats

Cette section présente les résultats des observations au microscope binoculaire, des essais d'absorption capillaire et des essais de cohésion en traction qui ont permis d'étudier l'influence de la méthode de préparation de surface sur l'intégrité de la surface préparée (substrat du système de réparation).

3.3.1 Observations au microscope binoculaire

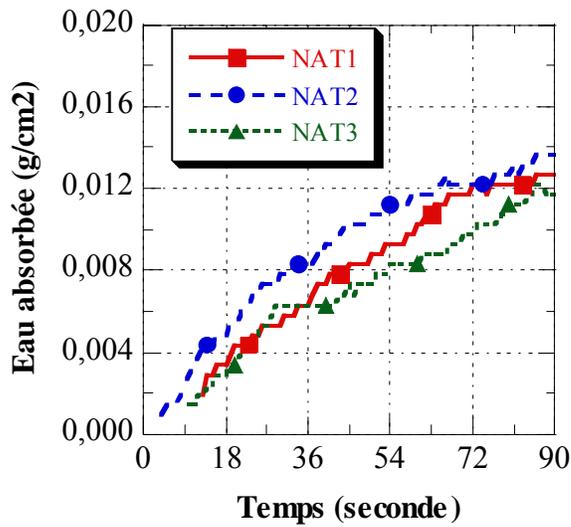
Dans la littérature, il est reconnu que l'endommagement du substrat dans un système de réparation diminue la qualité de l'adhérence [Hindo, 1990; Silfwerbrand, 1990]. Aucune étude toutefois n'a porté attention à la quantification de cet endommagement. Dans le présent projet, des observations au microscope binoculaire ont été réalisées afin de vérifier l'intégrité des surfaces préparées. Le tableau 3.1 présente les principaux résultats des observations au microscope binoculaire. Un schéma des fissures repérées sur chacune des plaques ainsi que le détail des mesures prises pour chacune d'elles sont fournis à l'Annexe C.

Tableau 3.1 – Observations des fissures pour les différentes préparations de surface

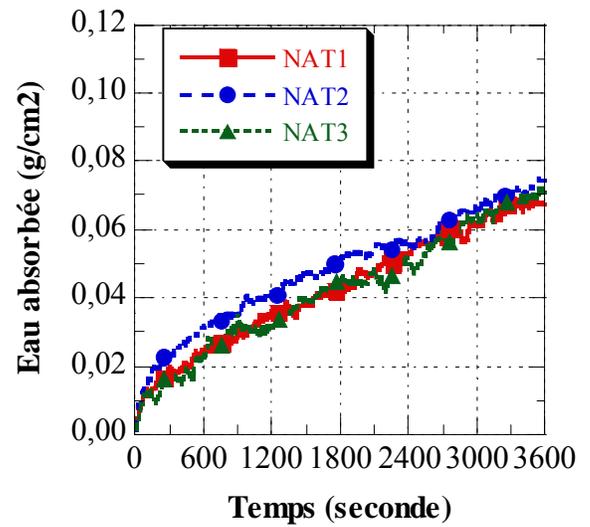
Préparation	Nombre de fissures principales/plaque	Longueur totale des fissures/plaque (mm)	Profondeur maximale (mm)
NAT	4	27	4,7
POL	2	9,3	4,0
SAB	2	11	12,0
SCA	1	4,3	2,7
HYD	5	29	7,3
MP7S	7	82	23
MP14S	8	100	25
MP21S	9	117	24

3.3.2 Essai d'absorption capillaire

Des essais d'absorption capillaire ont été réalisés afin de vérifier, d'une part, si la porosité de surface est influencée par la méthode de préparation de surface, et, d'autre part, s'il est possible de détecter la présence d'un endommagement. Les figures 3.5 à 3.12 permettent de visualiser les résultats des essais d'absorption capillaire pour les divers échantillons testés, après 90 secondes et 3600 secondes du début de l'essai. Le délai d'acquisition observé entre les échantillons s'explique par le temps nécessaire pour mettre toute la surface préparée (S_S) en contact avec l'eau, une rugosité plus élevée demandant plus de temps. La quantité d'eau absorbée par les échantillons a été considérée comme étant la masse d'eau absorbée, divisée par la surface spécifique. Cette surface spécifique a été évaluée en multipliant par le facteur I_{ss} la surface géométrique (S_G), I_{ss} étant obtenu avec **RugoID**³ (voir section 5.2.1.3).

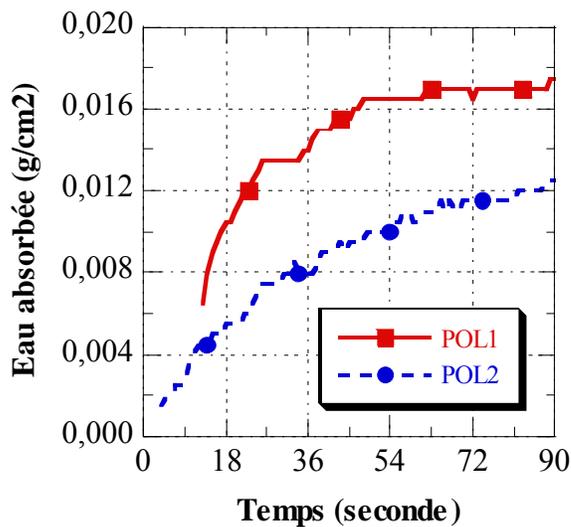


a) Court terme

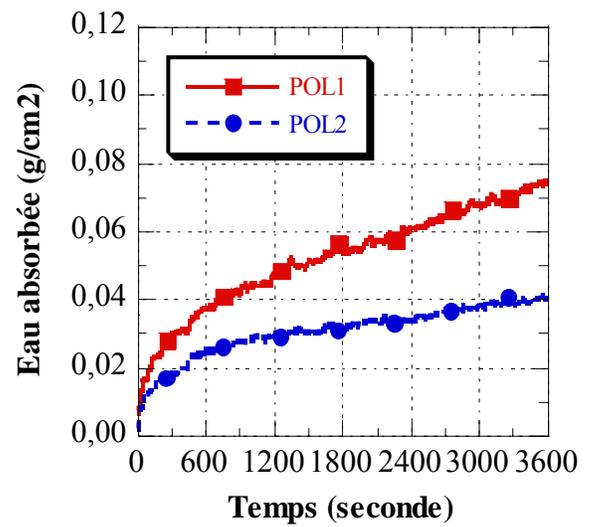


b) Long terme

Figure 3.5 – Absorption capillaire selon la surface spécifique pour les échantillons de la préparation NAT

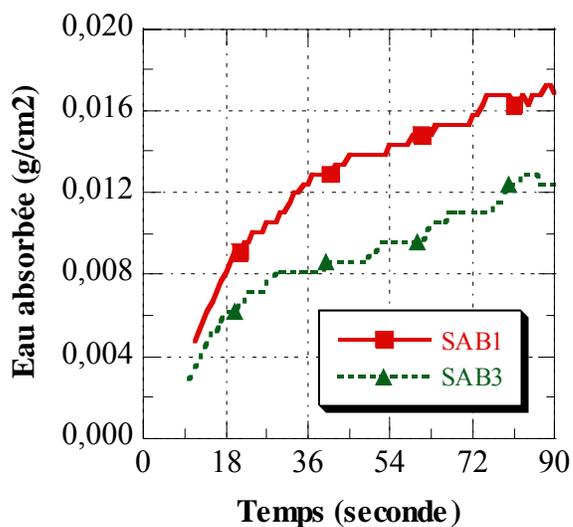


a) Court terme

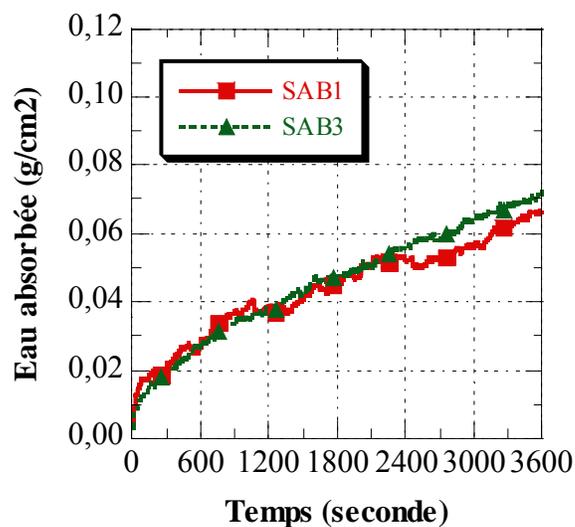


b) Long terme

Figure 3.6 – Absorption capillaire selon la surface spécifique pour les échantillons de la préparation POL

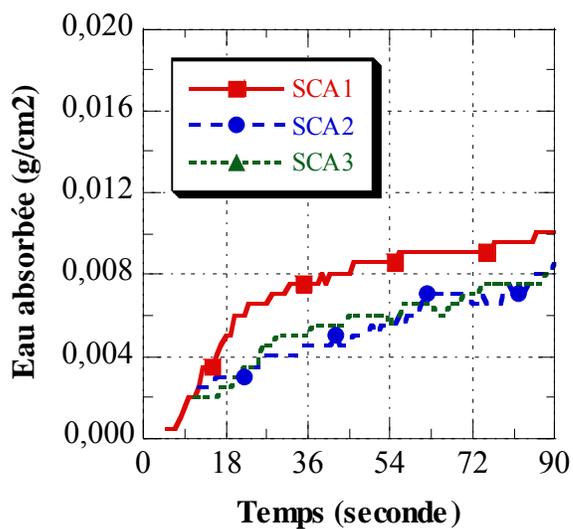


a) Court terme

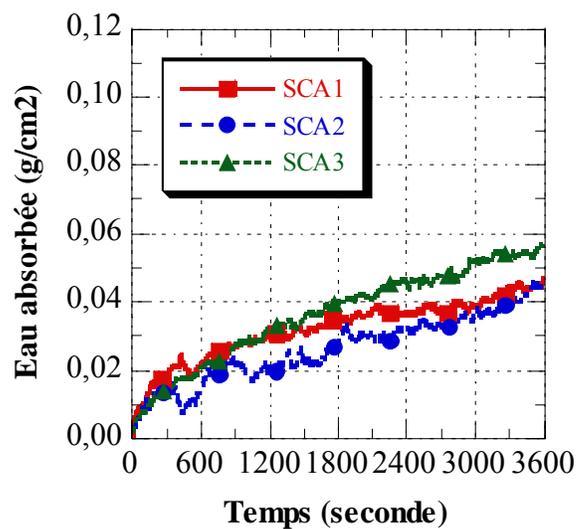


b) Long terme

Figure 3.7 – Absorption capillaire selon la surface spécifique pour les échantillons de la préparation SAB



a) Court terme



b) Long terme

Figure 3.8 – Absorption capillaire selon la surface spécifique pour les échantillons de la préparation SCA

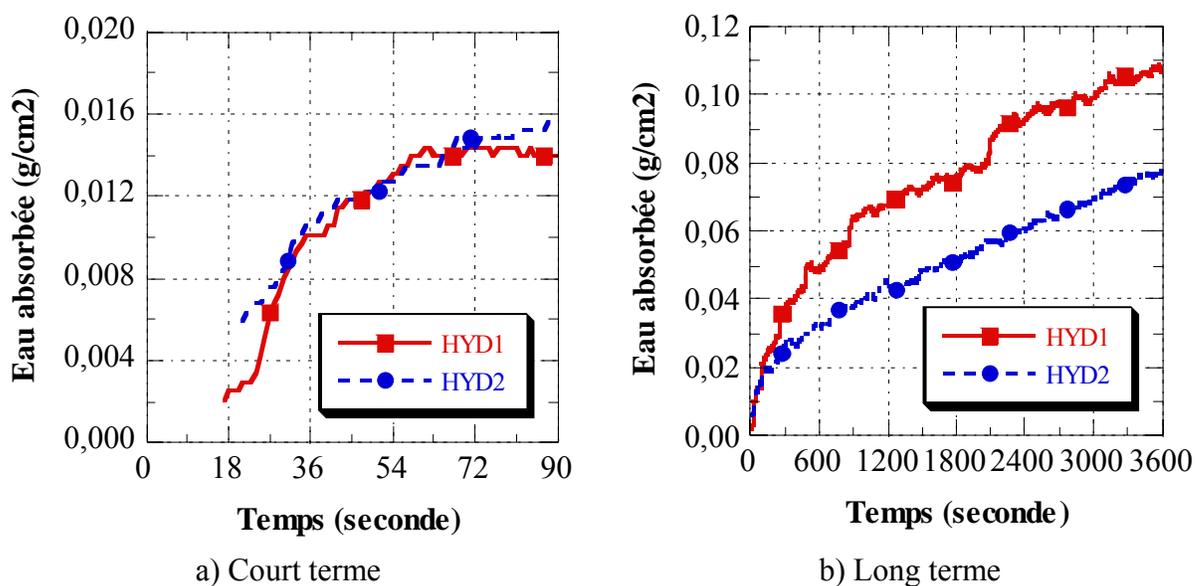


Figure 3.9 – Absorption capillaire selon la surface spécifique pour les échantillons de la préparation HYD

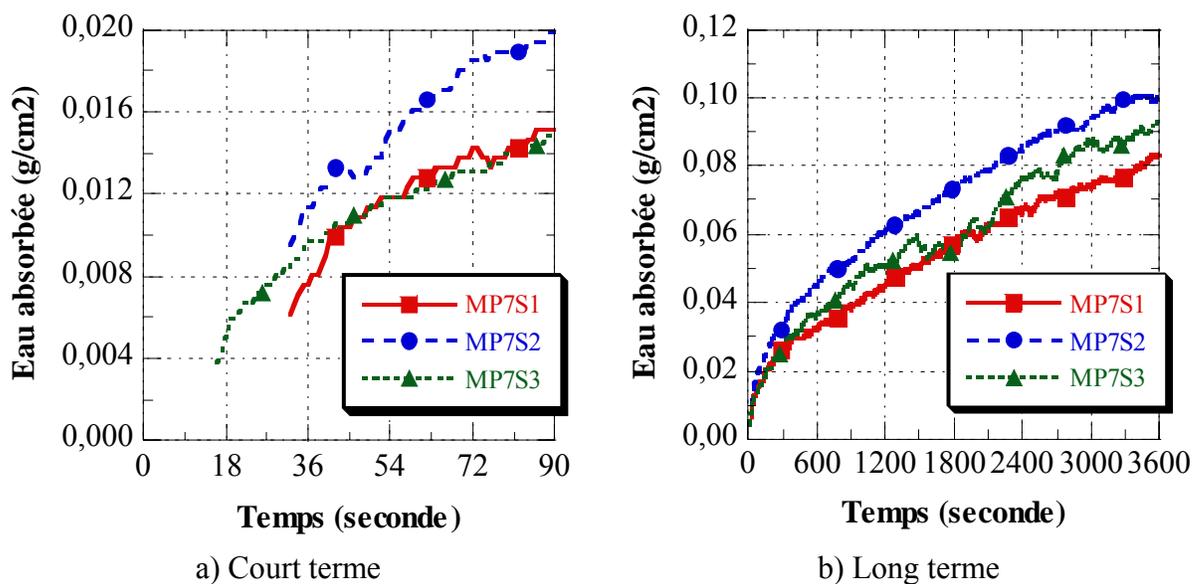


Figure 3.10 – Absorption capillaire selon la surface spécifique pour les échantillons de la préparation MP7S

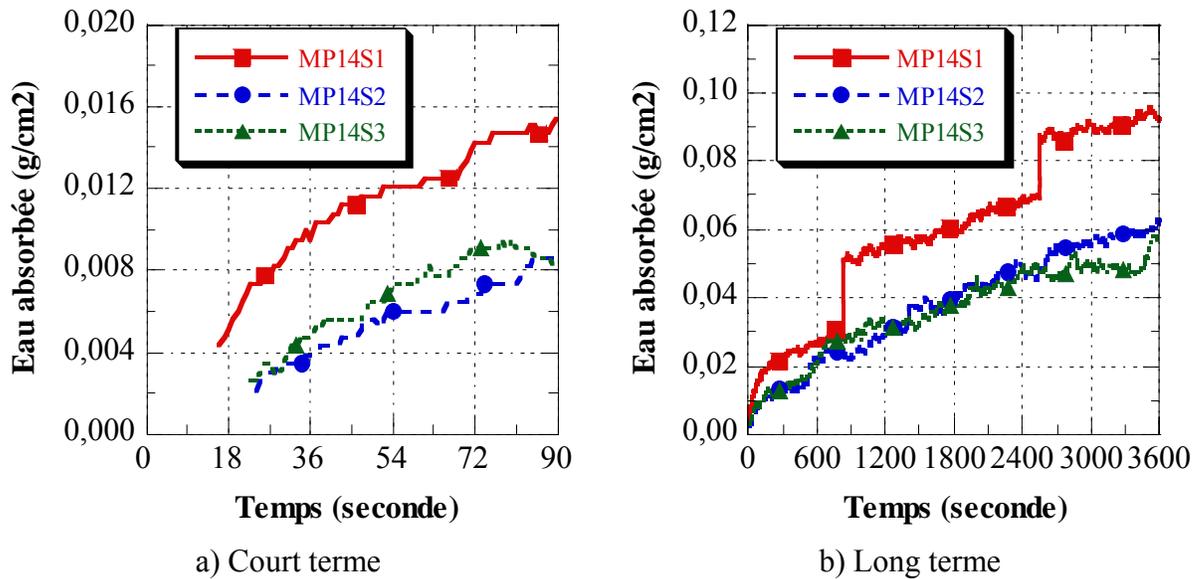


Figure 3.11 – Absorption capillaire selon la surface spécifique pour les échantillons de la préparation MP14S

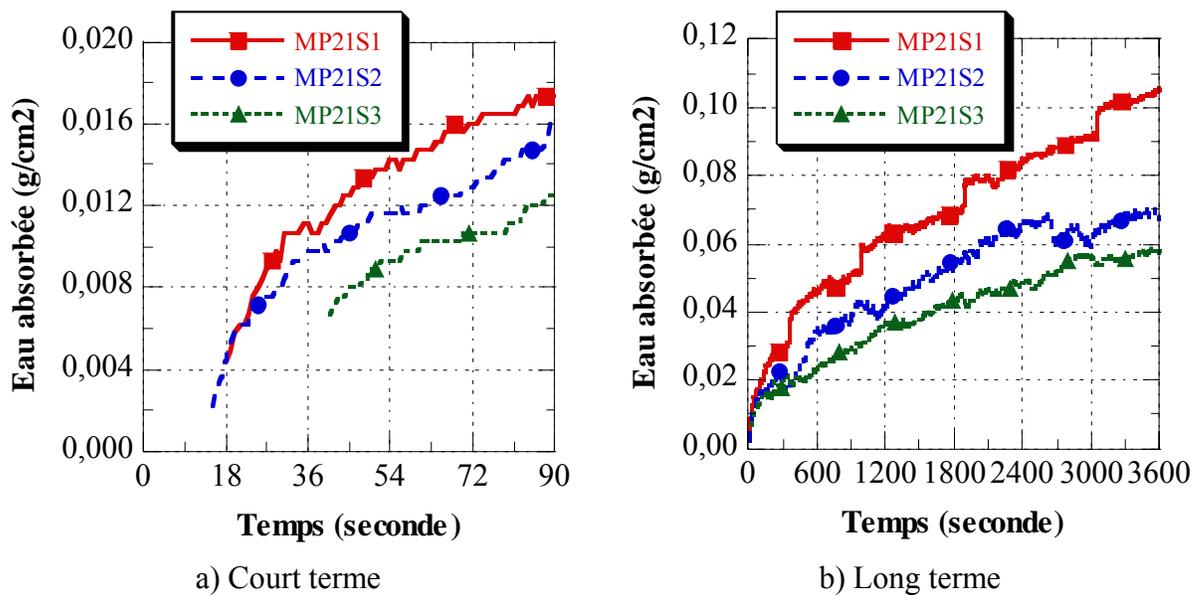


Figure 3.12 – Absorption capillaire selon la surface spécifique pour les échantillons de la préparation MP21S

Des essais supplémentaires ont permis de constater que les sauts présents dans les enregistrements ne sont pas des erreurs d'acquisition. En effet, des essais d'absorption capillaire ont été réalisés une seconde fois sur les échantillons qui ont présenté des sauts, et

des résultats similaires aux premiers essais ont été observés. Les essais d'absorption capillaire démontrent donc une bonne reproductibilité. Toutefois, pour la même surface préparée, les échantillons présentent parfois des différences importantes, comme c'est le cas pour les échantillons de la surface POL.

3.3.3 Essai de cohésion en traction sur surfaces préparées

Les résultats des essais de cohésion en traction réalisés sur les supports préparés pour les deux séries d'essais sont résumés dans le tableau 3.2. Le type de rupture obtenu pour chacun des essais, la résistance en traction moyenne et le coefficient de variation (CV) de l'ensemble des essais y sont présentés. L'Annexe B présente en détail les résultats des essais de cohésion en traction.

Tableau 3.2 – Cohésion des surfaces préparées selon le type de rupture à partir essais de cohésion en traction pour les deux séries d'essais

	Préparation	Type de rupture			Moyenne MPa	CV %
		Surface MPa	Fond MPa	Autre* MPa		
Série 1	NAT		3,28 (5)		3,28	8,1
	POL	3,40 (1)	3,51 (3)	3,17 (1)	3,42	7,6
	SAB		3,26 (5)		3,26	8,3
	SCA		3,41 (5)		3,41	2,5
	HYD	3,06 (1)	2,91 (4)		2,94	3,9
	MP7S	2,09 (4)	3,62 (1)		2,40	33,1
	MP14S	1,83 (5)			1,83	33,1
	MP21S	1,96 (5)			1,96	20,6
Série 2	SAB	2,67 (1)	3,31 (4)		3,18	9,8
	SCA		2,64 (2)	2,93 (4)	2,83	8,2
	HYD	2,22 (1)	2,74 (1)	2,71 (4)	2,63	12,3
	MP7	1,40 (4)		2,42 (2)	1,74	38,7
	MP14	1,15 (5)			1,15	51,9

*: rupture survenue entre le fond et la surface de l'échantillon

Note : le nombre de ruptures obtenu pour chaque type de rupture est indiqué entre parenthèses.

Les résultats permettent de constater que les surfaces préparées avec les marteaux pneumatiques sont caractérisées par des résistances plus faibles et plus variables que les autres méthodes de préparation.

3.4 Analyse des résultats

3.4.1 Cohésion et observations au microscope binoculaire

Les résultats des essais de cohésion en traction démontrent que selon la méthode de préparation adoptée, la cohésion peut varier considérablement. La figure 3.13 permet de visualiser graphiquement les résultats des essais de cohésion en traction pour les deux séries d'essais.

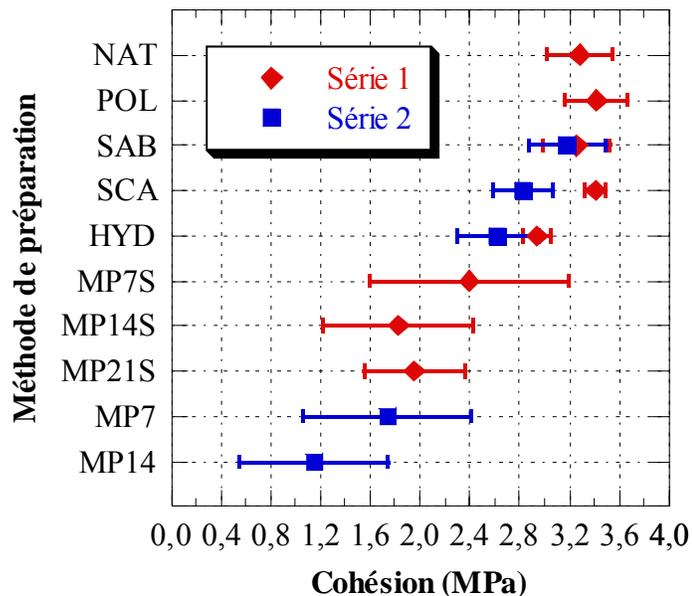


Figure 3.13 – Résultats des essais de cohésion en traction selon la méthode de préparation

Les surfaces préparées qui ont démontré les meilleures cohésions sont les surfaces NAT et POL de la série 1, ainsi que les surfaces SAB, SCA et HYD pour les deux séries d'essais. Non seulement les cohésions mesurées sont les plus élevées, mais les valeurs obtenues sont également peu variables. Les cohésions des surfaces hydrodémolies et la surface SCA de la série 2 sont toutefois un peu plus faibles. Pour leur part, les surfaces préparées avec les

marteaux pneumatiques ont présenté une diminution significative de la cohésion. Par exemple, une cohésion de 2,40 MPa a été obtenue pour la surface MP7S comparativement à 3,28 MPa pour la surface NAT, ce qui représente une réduction de 26,9%. De plus, les deux séries d'essais indiquent que la diminution de la cohésion est approximativement proportionnelle au poids du marteau pneumatique. Les valeurs mesurées sont également beaucoup plus variables avec les marteaux pneumatiques.

Afin de vérifier si les différences de cohésion sont attribuables à l'endommagement du béton, une comparaison des observations au microscope binoculaire avec les essais de cohésion en traction de la série 1 a été effectuée. La figure 3.14 présente graphiquement les résultats de cohésion pour chacune des méthodes de préparation selon le nombre de fissures et leur longueur totale par plaque analysée.

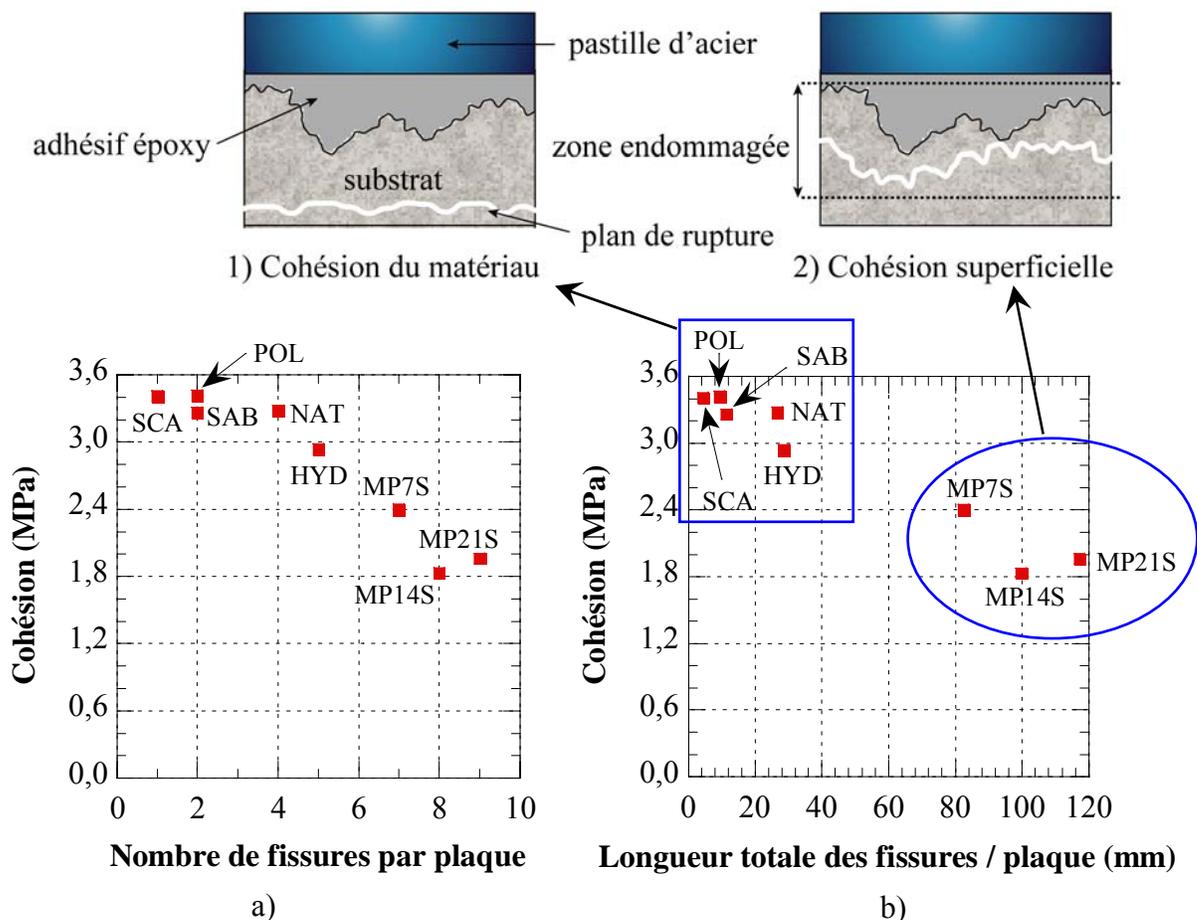


Figure 3.14 – Influence de l'endommagement sur la cohésion des surfaces préparées

Dans un premier temps, les résultats indiquent que les surfaces POL, SAB et SCA permettent de réduire l'endommagement apparent causé par le retrait de séchage, le nombre de fissures observables sur une surface de type NAT étant plus élevé. Toutefois, puisque les fissures causées par le retrait de séchage se manifestent de manière verticale et que celles observées sont de faibles longueurs, leur présence ne devrait pas, en principe, affecter de façon significative la cohésion mesurée. Ainsi, il n'est donc pas surprenant d'observer des cohésions similaires pour les surfaces NAT, POL, SAB et SCA. Les ruptures sont également survenues au fond du carottage dans pratiquement tous les cas pour ces surfaces. Pour la surface HYD, la légère diminution de la cohésion comparativement à la surface NAT peut être attribuable à une plus faible résistance du béton. En effet, tout comme les surfaces SAB et SCA, des ruptures de fond ont principalement caractérisé la surface HYD et, comme le montre le tableau 3.3, la cohésion évaluée pour les surfaces SAB et SCA se rapproche de la résistance en traction par fendage du béton. De ces faits, la valeur moyenne des cohésions mesurées pour les préparations NAT, POL, SAB, SCA et HYD a été nommée « cohésion du matériau ».

Tableau 3.3 – Résistance évaluée avec les essais de cohésion en traction et de traction par fendage

Préparation de surface	Essai de cohésion en traction (MPa)	Résistance en traction par fendage (MPa)
SAB	3,26	3,55
SAB série 2	3,18	3,55
SCA	3,41	3,42
SCA série 2	2,83	3,42

Dans un second temps, un endommagement important a été observé pour les surfaces préparées avec les marteaux pneumatiques comparativement aux autres surfaces, la longueur moyenne des fissures étant nettement plus grande. Une seule rupture sur les quinze essais s'est produite au fond du carottage, alors que les autres ruptures ont eu lieu près de la surface. La cohésion de la surface préparée représente donc une « cohésion

superficielle ». La figure 3.14 révèle également que l'endommagement est plus important lorsque le poids du marteau pneumatique augmente, l'augmentation du poids de l'appareil entraînant une plus grande énergie d'impact. Il n'y a donc aucun doute que la diminution de la cohésion est attribuable à la présence de fissures en surface.

Les observations au microscope binoculaire ont également permis de constater que l'endommagement du béton avec les marteaux pneumatiques s'étend jusqu'à une profondeur de 23 mm pour le MP7S, 25 mm pour le MP14S et 24 mm pour le MP21S. Ces profondeurs de l'endommagement avec les marteaux pneumatiques sont beaucoup plus grandes que celle mentionnée par Hindo [1990], soit 9 mm. Il semble donc préférable de limiter le poids du marteau pneumatique lors de la préparation d'une surface sur chantier. D'ailleurs, afin de préserver l'intégrité des éléments, le ministère des Transports (MTQ) limite le poids du marteau pneumatique en fonction du type d'élément à réparer. Par exemple, le poids maximal permis pour des éléments minces et élancés est de 15 kg [Drapeau et Bélanger, 1995].

Les résultats présentés dans cette section indiquent que l'essai de cohésion en traction permet non seulement de distinguer une surface endommagée d'une surface intacte, mais également le niveau d'endommagement de la surface préparée. L'essai de cohésion en traction s'avère donc être une méthode quantitative qui permet d'évaluer convenablement l'intégrité d'une surface préparée.

3.4.2 Essais d'absorption capillaire

Les résultats d'absorption capillaire démontrent qu'il existe de légères différences entre les méthodes de préparation de surface. Pour l'ensemble des essais, les courbes d'absorption semblent afficher deux régimes. Le premier régime est caractérisé par une absorption initiale rapide dont le taux d'absorption diminue jusqu'à environ 1200 secondes. Par la suite, le taux d'absorption se stabilise et l'absorption augmente de manière constante. Cette seconde partie des courbes d'absorption caractérise le second régime. Les figures 3.5 à 3.12 permettent d'observer que les principales différences entre les surfaces préparées se situent

pendant la première phase. L'attention sera donc portée sur les mesures prises pendant cette période. Le tableau 3.4 présente les quantités d'eau absorbée après 90 et 1200 secondes.

Tableau 3.4 – Quantité d'eau absorbée après 90 et 1200 secondes

		Nombre d'échantillon	Eau absorbée après 90 s		Eau absorbée après 1200 s	
			Moyenne (g/cm ²)	CV (%)	Moyenne (g/cm ²)	CV (%)
Préparation de surface	NAT	3	0,0127	7,7	0,0366	14,0
	POL	2	0,0150	23,6	0,0384	33,1
	SAB	2	0,0146	20,9	0,0380	0,9
	SCA	3	0,0089	11,8	0,0281	22,9
	HYD	2	0,0150	10,0	0,0562	29,8
	MP7S	3	0,0166	17,1	0,0518	15,4
	MP14S	3	0,0109	36,7	0,0383	36,6
	MP21S	3	0,0153	16,6	0,0472	29,8

Le tableau 3.4 permet de constater que les échantillons des surfaces POL, SAB, HYD et MP21S présentent des absorptions semblables à la suite des 90 premières secondes de l'essai, légèrement supérieures à celle des échantillons de la surface NAT. Pour leur part, les spécimens de la surface SCA ont démontré la plus faible absorption. Dans le cas de la surface MP7S, la quantité d'eau absorbée par les échantillons est la plus élevée. Pour ce qui est des spécimens de la surface MP14S, ils ont enregistré la deuxième plus faible quantité d'eau absorbée.

Après 1200 secondes d'essai, les surfaces POL et SAB présentent toujours des absorptions similaires, respectivement de 0,0384 et 0,0380 g/cm². Alors que les surfaces MP14S montraient une absorption plus faible que les deux surfaces POL et SAB pendant les 90 premières secondes, la quantité d'eau absorbée est sensiblement la même après 1200 secondes, soit 0,0383 g/cm². Les surfaces SCA sont demeurées les surfaces avec l'absorption capillaire la plus faible. De plus, les surfaces HYD, MP7S et MP21S ont

absorbé davantage d'eau que les échantillons de la surface NAT, la surface HYD étant celle qui a démontré la plus grande augmentation.

Il est difficile de mentionner si les différences mesurées entre les surfaces préparées sont significatives puisque très peu d'essais de ce type ont été réalisés. Seul Courard [1999] a réalisé des essais similaires avec des surfaces polies et sablées. Après 60 secondes, la masse d'eau absorbée lors des essais de Courard était d'environ 0,56 g pour une surface polie et de 0,17 g pour une surface sablée. La surface polie avait donc absorbé 2,29 fois plus d'eau que la surface sablée. Pour le présent projet, les faibles différences observées après 90 secondes pour les surfaces POL, SAB, HYD, MP14S et MP21S comparativement aux surfaces NAT paraissent donc peu importantes.

Pour les échantillons des surfaces SCA et MP7S, la quantité d'eau absorbée après 90 secondes diffère de celle qui caractérise les spécimens des surfaces NAT. Dans le cas de la surface SCA, l'eau absorbée est moins importante que celle de la surface NAT, alors que le contraire a été observé pour la surface MP7S. Différentes hypothèses peuvent apporter une explication à ces résultats. Pour la surface SCA, une exposition plus importante des granulats, qui sont moins poreux que la pâte de ciment, une porosité de surface moins importante ou une réduction de l'ouverture des pores pourraient expliquer la diminution de l'eau absorbée comparativement à la surface NAT. Pour la surface MP7S, l'augmentation de l'absorption capillaire pourrait s'expliquer par les phénomènes inverses supposés précédemment. Il est également possible que la poudre de ciment générée au cours de la scarification ait eu pour effet d'obturer partiellement la porosité superficielle. Toutefois, le manque d'information ne permet pas d'affirmer que les différences observées pour les surfaces SCA et MP7S, comparativement à la surface NAT, sont réellement induites par la méthode de préparation.

Les essais d'absorption capillaire ont également démontré parfois des sauts dans les enregistrements. Par exemple, l'absorption d'eau pour l'échantillon HYD1 à environ 94

secondes d'acquisition est caractérisée par une augmentation rapide d'environ $0,05 \text{ g/cm}^2$, sur une période approximative de 4 secondes, tel que présenté sur la figure 3.15.

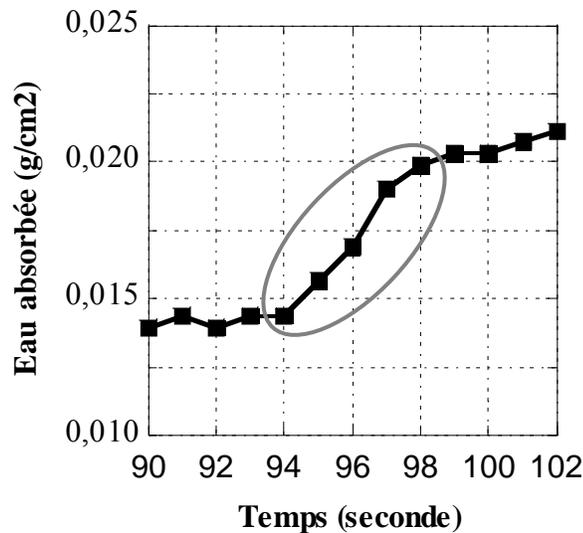


Figure 3.15 – Saut présent lors de l'acquisition des données de l'échantillon HYD1

Deux éléments peuvent apporter une explication concrète à ces observations : la présence d'un pore de forte dimension ou d'une fissure. D'après la définition du système poreux de Courard [1999], les pores qui peuvent expliquer ces hausses rapides d'absorption sont les gros pores capillaires, dont le diamètre varie entre $10 \mu\text{m}$ et $20 \mu\text{m}$, ou des macropores, dont le diamètre est supérieur à $20 \mu\text{m}$. Les échantillons ayant été prélevés sur des bétons présentant les mêmes compositions, ces sauts seraient davantage associés à la présence d'un macropore ou d'une fissure près de la surface. Dans la majorité des cas, la hausse de l'absorption se produit sur une courte période de temps. Le défaut se doit donc d'être de faible hauteur. S'il s'agit d'une fissure, elle doit être orientée le plus possible perpendiculairement à la montée de l'eau. Les observations au microscope binoculaire, présentées dans l'Annexe C, permettent de constater que plusieurs fissures sont parallèles à la surface préparée, donc perpendiculaires à la montée de l'eau. De plus, l'ouverture des fissures est comprise dans bien des cas entre $50 \mu\text{m}$ et $100 \mu\text{m}$, allant même jusqu'à $600 \mu\text{m}$ dans le cas de surfaces MP21S. Les montées brusques d'absorption d'eau étant observables seulement pour les surfaces HYD et celles avec les marteaux pneumatiques, il

semble raisonnable de penser qu'elles sont causées par la présence de fissures plutôt que de macropores.

3.5 Conclusion

L'essai de cohésion en traction a démontré des résistances beaucoup plus faibles pour les surfaces préparées avec les marteaux pneumatiques. Les observations au microscope binoculaire ont permis d'observer qu'un endommagement important de ces surfaces est responsable de leur faible cohésion, comparativement aux surfaces SAB, SCA et HYD. Les essais d'absorption capillaire vont également dans le même sens puisque des sauts ont été observés dans les acquisitions pour les surfaces MP7S, MP14S, MP21S. Les essais d'absorption capillaire ont également permis de démontrer qu'il n'existe pas de différence significative de la porosité de surface des surfaces préparées. En effet, mis à part les échantillons SCA et MP7S, qui présentent des comportements quelque peu différents de ceux de la préparation NAT, les courbes d'absorption capillaire et les quantités d'eau absorbée sont sensiblement les mêmes.

Les observations au microscope binoculaire et les essais d'absorption capillaire ont permis d'apporter une explication aux résistances évaluées des surfaces préparées et de démontrer que l'essai de cohésion en traction est une méthode de caractérisation quantitative fiable et reproductible qui permet d'évaluer convenablement l'intégrité des surfaces préparées.

Chapitre 4 Développement d'une méthode de caractérisation quantitative accélérée des surfaces préparées

4.1 Introduction

Les résultats des essais de cohésion en traction, présentés au Chapitre 3, ont démontré l'efficacité de cette méthode à caractériser l'intégrité des surfaces préparées. Toutefois, l'essai de cohésion en traction nécessite un outillage lourd et encombrant et des précautions doivent être prises pour réaliser convenablement le carottage. De plus, seules les surfaces préparées horizontalement peuvent être testées à l'heure actuelle avec l'essai de cohésion en traction. L'objectif du second volet expérimental est donc de développer une méthode de caractérisation quantitative applicable peu importe l'orientation de la surface préparée et réalisable sur une courte période de temps.

4.2 Méthodologie

Afin de développer la méthode de caractérisation quantitative (essai accéléré de cohésion), trois séries d'essais ont été réalisées. La première série d'essais correspond à des essais préliminaires qui ont permis de déterminer les paramètres initiaux de l'essai accéléré de cohésion. La deuxième série d'essais (essais principaux) a servi à déterminer les paramètres optimaux de l'essai accéléré de cohésion et à comparer cet essai à trois autres méthodes de caractérisation quantitative, soit l'essai au marteau Schmidt, l'essai pull-out foré et l'essai de cohésion en traction. La troisième série d'essais a mis à l'épreuve l'essai accéléré de cohésion sur des surfaces préparées et les résultats ont été comparés à ceux obtenus avec des essais au marteau Schmidt et de cohésion en traction.

4.2.1 Corps d'épreuves

Afin de réaliser les essais préliminaires (première série d'essais), des dalles de béton projeté par voie humide de 75 cm × 75 cm × 8 cm ont été utilisées. Les surfaces de ces dalles ont été finies à la truelle. La composition du béton projeté est présentée dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1 – Composition du béton projeté

Type de béton		WC
E/L		0,38
Composition par m ³ :		
Ciment type 10 SF *	(kg)	400
Granulat fin – calcaire	(kg)	840
Gros granulat – calcaire (2,5/10 mm)	(kg)	810
Eau	(kg)	150
Agent entraîneur d’air	(ml)	421
Superplastifiant (hydroxy-carboxylate)	(ml)	230

* : le ciment type 10 SF est un ciment Portland de type 10 pré-mélangé avec 8% de fumée de silice

Pour la deuxième série d’essais, treize dalles de béton coulé, cinq de 50 cm × 50 cm × 9 cm (type A) et huit de 73 cm × 73 cm × 9 cm (type B) ont été employées. Les dalles ont été confectionnées à l’aide de trois mélanges de béton, soit les bétons C1, C2 et C3. Un léger jet de sable (pression de 650 kPa) a été passé sur le dessus des dalles afin d’enlever la laitance. La troisième série d’essais a été réalisée sur trois supports en béton, fabriqués lors du premier volet expérimental. Un léger jet de sable a été employé sur deux des quatre côtés des supports, alors qu’une des surfaces horizontales a été préparée avec un marteau pneumatique. Pour chacun des supports, un poids différent du marteau pneumatique (MP) a été utilisé, soit 9, 11 et 35 kg. Les supports sont identifiés ainsi : support 1 pour le MP9, support 2 pour le MP11 et support 3 pour le MP35. Les poids utilisés pour ce volet expérimental diffèrent de ceux utilisés dans le premier volet suite à une mauvaise communication avec le responsable de la réalisation des préparations. La composition des bétons qui caractérise les dalles des essais principaux et les supports est présentée dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2 – Composition des bétons pour les dalles de béton coulé et les supports

		Béton C1	Bétons C2 et C3	Supports 1 à 3
E/C		0,40	0,48	0,40
Composition par m ³ :				
Ciment T10	(kg)	392	392	392
Eau	(kg)	159	190	159
Granulat fin – calcaire	(kg)	752	752	752
Gros granulat – calcaire (2,5/10 mm)	(kg)	—	938	938
Gros granulat – calcaire (10/20 mm)	(kg)	938	—	—
Agent entraîneur d’air	(ml)	78	78	78
Superplastifiant				
Polycarboxylate	(ml)	980	1301	—
Naphtalène	(ml)	—	—	2352

La mise en place des bétons a été réalisée avec une aiguille vibrante. Suite à la prise initiale du béton, celui-ci a été humidifié à l’aide de jutes humides et recouvert d’un polythène pendant un peu plus de 50 heures. Une fois les coffrages enlevés, les dalles ont été mises dans une salle à 23°C et 100% H.R. pendant 26 jours. Pour leur part, les supports ont été humidifiés pendant 7 jours et entreposés à la température ambiante dans l’entrepôt du laboratoire de béton. Les dalles ont également été placées dans ces conditions une fois la cure humide terminée. Lors des essais, les dalles étaient âgées d’environ 16 semaines, alors que les supports préparés dataient d’un peu plus de 43 mois.

4.2.2 Conditions initiales de l’essai accéléré de cohésion

Afin de minimiser les opérations permettant la préparation d’un essai et de pouvoir évaluer des surfaces préparées, peu importe sa condition, une méthode faisant appel à un ancrage a été développée. Les deux principaux paramètres qui ont été étudiés afin de développer l’essai accéléré de cohésion sont le type d’ancrage et la profondeur de forage. Deux types

d'ancrage ont été testés : mécanique (MC) et chimique (CH). Ces ancrages nécessitent la mise en place d'une tige d'acier dans un forage réalisé dans le béton. Pour les ancrages mécaniques, une partie expansive, située à la base de la tige d'acier, assure une adhérence minimale avec le béton suite à l'application d'un couple de torsion. Pour les ancrages chimiques, une tige filetée est insérée dans un forage de 1,6 mm plus grand que le diamètre de la tige. Le lien entre le béton et la tige est obtenu en noyant la tige dans un adhésif époxy à prise rapide à deux composantes.

Puisque les observations au microscope binoculaire du Chapitre 3 ont démontré que l'endommagement des surfaces se situe tout au plus à 25 mm sous la surface préparée, alors des profondeurs de forage inférieures ou égales à 25 mm ont été évaluées. De plus, pour chacun des ancrages, deux diamètres ont été retenus. Pour les ancrages mécaniques, des tiges de 6,4 mm de diamètre (MC1) et de 9,5 mm de diamètre (MC2), faisant 57,2 mm de long, ont été utilisées. Des couples de torsion de 6,8 N·m (5 pi·lb) pour l'ancrage MC1 et de 27,0 N·m (20 pi·lb) pour l'ancrage MC2 ont été appliqués selon les recommandations du fournisseur. Pour les ancrages chimiques, des tiges filetées de 6,4 mm de diamètre (CH1) et de 9,5 mm de diamètre (CH2), coupées selon la longueur désirée, ont été employées.

L'appareil portatif de chargement en traction a également été utilisé pour mettre sous tension les ancrages. Un connecteur en acier a été utilisé afin de relier l'ancrage à l'appareil, comme il est possible de l'observer sur la figure 4.1. Un taux de chargement de 220 N/s a été utilisé afin de réaliser les essais, et correspond au taux de mise en charge d'un essai pull-off pour une pastille de 75 mm de diamètre selon la norme européenne prEN 1542 [1994], soit 0,05 MPa/s.



a) Appareil portatif de chargement en traction



b) Connecteur en acier

Figure 4.1 – Dispositifs utilisés afin de réaliser les essais accélérés de cohésion

4.2.3 Caractérisation des matériaux

Des essais d'affaissement au cône d'Abrams [ASTM C143, 1999] et de teneur en air [ASTM C231, 1999] ont été effectués sur les bétons frais quelques minutes après la fin de la séquence de malaxage. Les propriétés mécaniques des bétons durcis ont également été évaluées en déterminant le module d'élasticité [ASTM C469, 1999], la résistance en compression [ASTM C39, 1999] et la résistance en traction par fendage (essai « brésilien ») [ASTM C496, 1999]. Les essais mécaniques ont été réalisés sur des cylindres vibrés de 100 mm × 200 mm. Ils ont été mûris dans un environnement à 23°C et 100 % H.R. jusqu'à l'échéance des essais, soit 7 et 28 jours. Les résistances en compression et en traction par fendage ont également été vérifiées à 123 jours, soit quelques heures avant la réalisation des essais sur les dalles de béton coulé. Seuls les résultats à 28 et 123 jours sont présentés à l'Annexe A, ainsi que ceux des bétons pour les trois supports utilisés (âgés d'un peu plus de 43 mois) et provenant du premier volet expérimental.

4.3 Présentation des résultats

Cette section présente les résultats de tous les essais qui ont permis de développer et de valider l'essai accéléré de cohésion de surfaces en béton. Les propriétés mécaniques des bétons utilisés pour fabriquer les corps d'épreuves sont présentées dans le tableau 4.3. Pour

les dalles de béton projeté utilisées pour les essais préliminaires, les propriétés mécaniques n'ont pas été évaluées puisque les dalles ont servi seulement à déterminer les paramètres initiaux de l'essai accéléré de cohésion. Ces paramètres initiaux sont : le type d'ancrage, les profondeurs de forage à évaluer pour les essais principaux, l'espacement entre les essais et le temps nécessaire à la polymérisation de l'adhésif époxy.

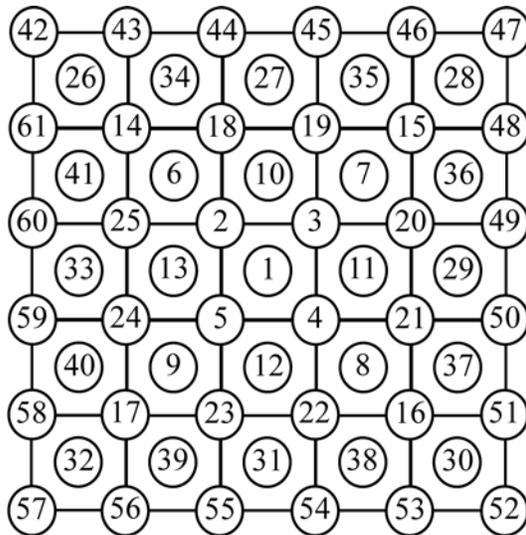
Tableau 4.3 – Propriétés mécaniques des corps d'épreuves

	Essais principaux			Essais sur supports	
	Béton C1	Béton C2	Béton C3	Supports 1 et 2	Support 3
Résistance en compression, f_c (MPa)	32,3	46,0	41,7	48,3	49,8
Résistance en traction, f_{st} (MPa)	3,33	4,03	3,83	—	3,55
Module d'élasticité, E_c (MPa)	27900	34100	31900	—	32600

4.3.1 Essais préliminaires

4.3.1.1 Essai au marteau Schmidt

Afin de se familiariser avec l'essai au marteau Schmidt et de déterminer le nombre d'essais qui doit être réalisé pour obtenir une mesure représentative de la résistance du béton, une dalle composée du béton C2 a été utilisée. La figure 4.2 illustre les essais au marteau Schmidt réalisés sur la dalle et utilisés pour effectuer l'analyse statistique présentée dans la section 4.4.1.1. Les mesures ont été prises dans un quadrillage de 5 lignes et de 5 colonnes, délimité par une bande libre sur le contour des dalles afin d'éviter les effets de bord. La largeur de cette bande est de 50 mm pour les dalles de type A et 100 mm pour les dalles de type B. Afin de déterminer le nombre significatif d'essais, huit cas ont été considérés tels qu'ils sont présentés à la figure 4.2.



- Cas 1: valeurs pour les numéros 1 à 5
- Cas 2: valeurs pour les numéros 1 à 9
- Cas 3: valeurs pour les numéros 1 à 13
- Cas 4: valeurs pour les numéros 1 à 17
- Cas 5: valeurs pour les numéros 1 à 25
- Cas 6: valeurs pour les numéros 1 à 33
- Cas 7: valeurs pour les numéros 1 à 41
- Cas 8: valeurs pour les numéros 1 à 61

Figure 4.2 – Essais au marteau Schmidt

La figure 4.2 permet de constater que les valeurs obtenues avec l'essai au marteau Schmidt sont très variables. Plusieurs facteurs peuvent expliquer ces variations : l'absence d'un dispositif garantissant la perpendicularité de l'extrémité du marteau sur la surface de béton, la sensibilité de l'appareil aux variations locales dans le béton et la position du marteau par rapport à la verticale (voir section 2.3.3).

4.3.1.2 Détermination des paramètres initiaux de l'essai accéléré de cohésion

Les quatre modèles d'ancrage décrits dans la section 4.2.2 ont été testés afin de déterminer la faisabilité de chacun et vérifier les espacements requis. Des profondeurs de forage, inférieures à 15 mm et 25 mm respectivement pour les ancrages MC1 et MC2, n'ont pas été évaluées puisque le dispositif d'expansion n'est pas complètement inséré dans le béton. Le tableau 4.4 présente les résultats généraux qui ont été obtenus pour tous les cas considérés. Il est possible de consulter l'Annexe D pour obtenir les détails de ces résultats.

Tableau 4.4 – Essais accélérés de cohésion pour les diverses combinaisons testées

Prof. moyenne	Charge de rupture selon l'ancrage							
	Moyenne (kN)				CV (%)			
	MC1	MC2	CH1	CH2	MC1	MC2	CH1	CH2
11 mm				1,93 (4)				52,5
15 mm	2,03 (3)		4,46 (8)		2,8		12,6	
20 mm	7,06 (8)		5,74 (8)	7,71 (8)	7,5		18,8	4,2
25 mm		11,9 (7)		10,4 (6)		9,3		11,0

Note : le nombre d'essais réalisés pour chacun des cas considérés est indiqué entre parenthèses.

Des essais ont également été réalisés avec les ancrages CH2 afin de vérifier l'influence de la profondeur de forage sur la force d'arrachement obtenue. Six essais ont été effectués pour les quatre profondeurs de forage suivantes : 15, 20, 25 et 30 mm. Le tableau 4.5 résume les principaux résultats obtenus (voir l'Annexe D pour de plus amples détails).

Tableau 4.5 – Effet de la profondeur de forage sur la force d'arrachement

Profondeur	(mm)	15	20	25	30
Force moyenne d'arrachement	(kN)	4,87	5,90	7,58	8,23
Coefficient de variation	(%)	9,3	14,6	22,0	23,8

Avec les ancrages mécaniques, plusieurs ancrages n'ont pu être retirés avec l'appareil d'essai, le béton s'opposant à l'arrachement de l'ancrage une fois la course du vérin hydraulique atteinte. Une force résiduelle était donc toujours mesurée à la fin de l'essai. Les forces résiduelles obtenues pour les deux ancrages mécaniques sont respectivement d'environ 4,5 kN pour l'ancrage MC1 et entre 6,7 et 7,3 kN pour l'ancrage MC2.

4.3.2 Essais principaux sur dalles de béton coulé

4.3.2.1 Essai au marteau Schmidt

La figure 4.3 montre les résistances moyennes en compression pour les 25 essais réalisés sur les dalles des bétons C1 et C3. Les dalles ont été déposées sur une surface plane et continue lors des mesures, soit sur une planche de bois ou directement sur la dalle de béton du laboratoire.

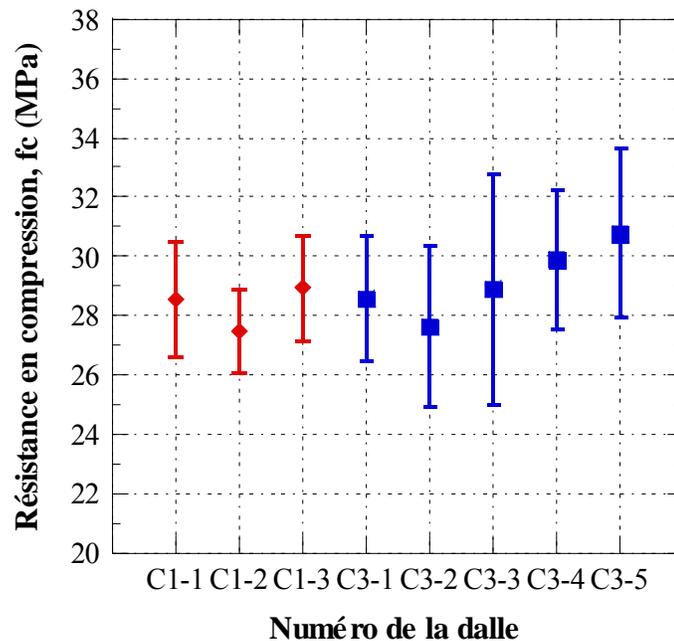


Figure 4.3 – Résistances moyennes en compression des dalles avec le marteau Schmidt

4.3.2.2 Détermination des paramètres optimaux de l'essai accéléré de cohésion

Les paramètres optimaux à déterminer sont le diamètre de l'ancrage et la profondeur de forage qui vont permettre d'obtenir des résultats fiables et représentatifs. Suite aux essais préliminaires, le type d'ancrage et les profondeurs de forage qui ont démontré les meilleures évaluations ont été testés. Il s'agit des ancrages chimiques (CH1 et CH2) et des profondeurs de forage de 15 et 20 mm. Les ancrages chimiques ont été préférés aux ancrages mécaniques étant donné les problèmes encourus avec les ancrages mécaniques (voir section 4.4.1.2). Un sommaire des résultats est présenté dans le tableau 4.6.

Tableau 4.6 – Résultats des tests menés selon les paramètres optimaux à déterminer

Type d'ancrage		Béton C3				Béton C1
		CH1		CH2		CH2
Profondeur de forage	(mm)	15	20	15	20	20
Force moyenne d'arrachement	(kN)	3,98	6,01	4,39	7,04	5,54
Coefficient de variation	(%)	8,4	6,5	6,4	6,1	11,3
Rupture par cône/nombre d'essais		3/8	4/8	8/8	5/8	8/8

4.3.2.3 Évaluation des cônes de rupture des essais accélérés de cohésion

Lors des essais accélérés de cohésion, deux principaux types de rupture ont été observés :

1. La rupture de type 1, qui se caractérise par l'extraction de l'ancrage seul ou avec une faible quantité de béton située en surface. Cette rupture peut être engendrée par une polymérisation insuffisante de l'adhésif ou la présence d'un défaut de collage (bulle d'air ou manque d'adhérence entre l'adhésif et le béton), entraînant une perte d'adhérence de l'adhésif sur le béton et une rupture progressive de celui-ci.
2. La rupture de type 2, qui se manifeste par la présence de béton avec l'ancrage, dont la forme s'apparente à un cône. Dans plusieurs cas, la partie du béton extraite avec la tige semblait présenter 2 troncs de cônes. Ce type de rupture a été nommé « rupture par cône ». La figure 4.4 présente une idéalisation du type de rupture observé, ainsi que les différents paramètres établis afin de caractériser la rupture par cône.

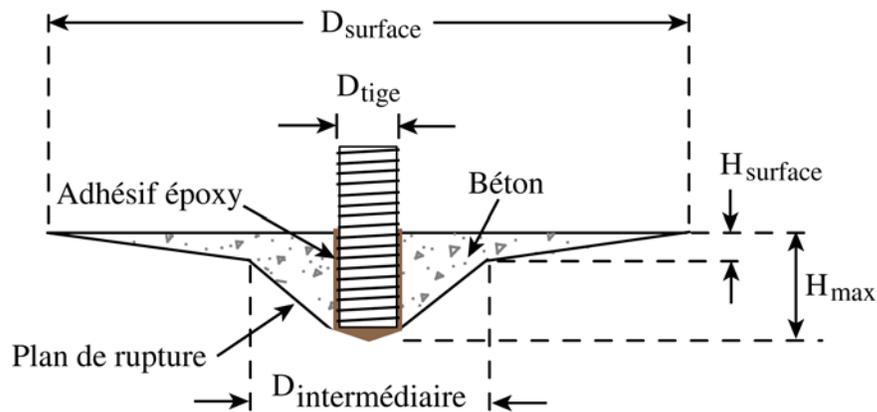


Figure 4.4 – Idéalisations du cône de rupture

La rupture de type 2 est évidemment celle désirée, car elle est garante d'une bonne adhérence de l'adhésif avec le béton et l'ancrage. Des mesures des cônes ont été effectuées afin de pouvoir évaluer les paramètres qui les caractérisent et d'estimer la surface sollicitée lors de l'essai accéléré de cohésion. Le tableau 4.7 présente les valeurs moyennes pour chacun des paramètres selon la profondeur et le diamètre de la tige de l'ancrage pour les deux bétons utilisés.

Tableau 4.7 – Résultats des mesures prises pour caractériser les cônes de rupture

Profondeur de forage (mm)	Béton C3				Béton C1
	15		20		20
$D_{\text{tige}} (D_t)$	(mm) 6,4	9,5	6,4	9,5	9,5
Nombre de cônes mesurés	3	8	3	5	8
$D_{\text{intermédiaire}}$	(mm) 30,1 (16,5)	44,3 (15,9)	27,2 (32,2)	65,4 (49,3)	41,8 (33,0)
D_{surface}	(mm) 97,0 (31,6)	118 (14,6)	71,3 (20,4)	147 (25,6)	93,1 (40,1)
H_{max}	(mm) 12,8 (22,1)	14,2 (4,9)	11,0 (17,5)	19,2 (6,6)	15,1 (21,6)
H_{surface}	(mm) 6,33 (27,1)	7,32 (13,9)	4,03 (14,8)	8,64 (20,1)	6,15 (20,4)

Note : les nombres entre parenthèses indiquent le coefficient de variation exprimé en pourcentage.

4.3.2.4 Essai pull-out foré

Lors des essais principaux, l'essai pull-out foré a été utilisé afin d'évaluer le potentiel de cet essai à quantifier la résistance en compression des bétons C1 et C3. Les résultats principaux des tests menés sur les dalles sont présentés dans le tableau 4.8, où la contrainte de compression est obtenue à partir de la table de calibration de l'appareil fournie par la compagnie (consulter l'Annexe D pour voir l'ensemble des essais).

Tableau 4.8 – Résistance en compression évaluée à partir d'essais de pull-out foré pour les deux bétons testés

	Béton C1	Béton C3
Résistance moyenne de compression (MPa)	31,0	33,7
Coefficient de variation (%)	12,5	11,2

Comparativement aux ruptures obtenues avec le béton C3, les ruptures avec le béton C1 ont démontré des irrégularités. Par exemple, des granulats non cisailés étaient parfois présents sur le plan de rupture.

4.3.2.5 Essai de cohésion en traction

Des essais de cohésion en traction ont également été effectués lors des essais principaux afin d'évaluer la résistance en traction des bétons C1 et C3. Une profondeur de carottage de 20 mm dans le béton a été adoptée afin de pouvoir comparer les résultats à ceux de l'essai accéléré de cohésion pour la même profondeur. Pour les essais avec la dalle confectionnée du béton C3, la moyenne pour les huit essais réalisés est de 3,93 MPa, avec un coefficient de variation de 4,9 %. Les ruptures ont été localisées dans le fond du carottage partiel pour tous les essais, comme le montre la figure 4.5.



Figure 4.5 – Surface de rupture type avec le béton C3

Pour les essais réalisés sur la dalle du béton C1, composée des pierres les plus grosses, les résultats sont fournis dans le tableau 4.9. Les ruptures obtenues y sont également indiquées puisqu'elles ont démontré une grande variabilité.

Tableau 4.9 – Résultats de l'essai de cohésion en traction avec le béton C1

No de l'essai	Cohésion (MPa)	Type de rupture
1	3,42	Près de la surface
2	3,06	Fond
3	3,35	Mi-profondeur / fond
4	3,24	Oblique: fond / surface
5	3,30	Surface
6	3,30	Milieu, déchaussement d'un granulat à cet endroit
7	3,12	Fond
8	3,40	À 5 mm du fond
Moyenne (MPa)	3,27	
CV (%)	3,7	

4.3.3 Essais sur supports préparés

4.3.3.1 Essai au marteau Schmidt

Le marteau Schmidt a été utilisé sur les faces des supports préparés, soit les quatre côtés et la surface horizontale préparée avec un marteau pneumatique, afin de vérifier s'il permet de distinguer l'état de la surface. Les figures 4.6 et 4.7 présentent les résultats obtenus selon la préparation de surface pour chacun des supports : naturelle (NAT), sablée (SAB) et marteau pneumatique (MP).

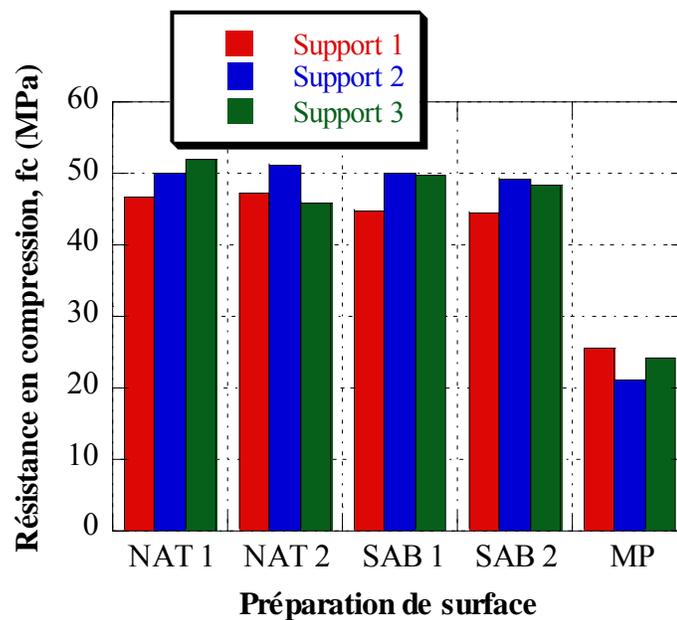


Figure 4.6 – Résistances de compression évaluées avec le marteau Schmidt

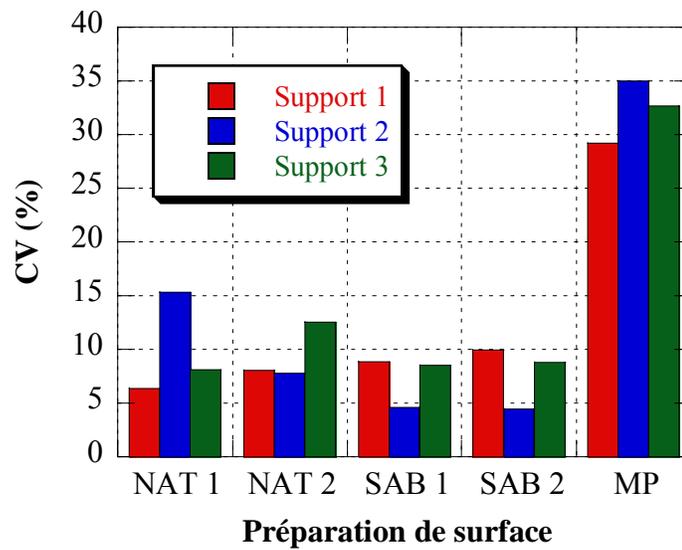


Figure 4.7 – Coefficient de variation des résistances en compression évaluées avec le marteau Schmidt

4.3.3.2 Essai accéléré de cohésion

Des essais accélérés de cohésion ont été effectués sur les trois préparations de surface réalisées sur les supports afin de valider l'essai. Des ancrages chimiques de 9,5 mm de diamètre et une profondeur de forage de 15 mm ont été considérés, puisqu'il s'agit des paramètres optimaux déterminés lors des essais principaux (voir section 4.4.2.1). Le tableau 4.10 montre les résultats obtenus sur les faces préparées pour les trois supports.

Tableau 4.10 – Essais accélérés de cohésion des faces préparées pour les trois supports

Préparation	Force d'arrachement					
	Moyenne (kN)			CV (%)		
	Support 1	Support 2	Support 3	Support 1	Support 2	Support 3
NAT	5,41	5,54	4,91	6,8	2,4	9,3
SAB	4,98	5,64	5,36	13,0	4,8	6,4
MP	4,98	4,85	4,91	24,7	18,0	24,9

4.3.3.3 Essai de cohésion en traction

Les résultats obtenus des essais de cohésion en traction sur les surfaces préparées avec les marteaux pneumatiques sont présentés dans le tableau 4.11. Les profondeurs de carottage minimales et maximales y sont inscrites, ainsi que la cohésion du béton et le type de rupture pour chacun des essais.

Tableau 4.11 – Résultats des essais de cohésion en traction

	Prof. min (mm)	Prof. max (mm)	Force d'arrachement (kN)	Cohésion (MPa)	Type de rupture
MP9-1	32	37	10,4	2,70	Surface
MP9-2	31	39	8,3	2,16	18 à 21 mm du fond
MP9-3	31	40	7,5	1,95	Surface
MP9-4	30	41	6,6	1,71	Surface
			Moyenne	2,13	
			CV (%)	19,8	
MP11-1	30	38	11,7	3,04	Surface
MP11-2	31	40	6,8	1,77	Surface
MP11-3	30	39	6,3	1,64	Surface
MP11-4	31	40	9,9	2,57	Surface
			Moyenne	2,25	
			CV (%)	29,6	
MP34-1	29	44	4,7	1,22	Diagonale*
MP34-2	37	67	5,8	1,51	Diagonale*
MP34-3	31	42	8,4	2,18	Surface
MP34-4	31	40	5,8	1,51	Surface
			Moyenne	1,60	
			CV (%)	25,4	

* : le point de rupture le plus bas correspond à un creux rempli d'adhésif époxy

4.4 Analyse des résultats

Les paragraphes qui suivent présentent les analyses qui ont été effectuées à partir des résultats des essais préliminaires, principaux et sur supports préparés et qui ont permis de développer et valider l'essai accéléré de cohésion.

4.4.1 Essais préliminaires

4.4.1.1 Nombre d'essais significatif pour le marteau Schmidt

Afin de déterminer le nombre d'essais nécessaire pour atteindre la précision requise sur la mesure (soit $P = 2\varepsilon$) pour l'essai au marteau Schmidt, la loi de Student a été utilisée. Selon cette loi [Moreau et Mathieu, 1979], l'effectif optimal n qui permet d'obtenir la précision demandée sur la mesure est évalué à partir de l'équation suivante :

$$n = \left[t_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\varepsilon} \right]^2 \quad (3)$$

où :

$t_{\frac{\alpha}{2}}$ = variable de Student qui varie selon l'effectif n ;

σ = l'écart-type sur la mesure;

ε = l'erreur sur la mesure.

En pratique, une valeur de départ égale à 2 est choisie pour la variable de Student pour un risque $\alpha = 0,05$. L'équation précédente devient alors :

$$n = 4 \left[\frac{\sigma^*}{\varepsilon} \right]^2 \quad (4)$$

L'étude statistique a été réalisée de sorte à connaître, à 5% près (ε) et dans un intervalle de confiance de 95%, la résistance en compression du béton. Règle générale, lorsque le nombre d'essais augmente, l'effectif optimal diminue et devient constant pour un nombre élevé d'essais. Comme il est possible de le remarquer sur la figure 4.8, un nombre d'essais N supérieur à 25 n'apporte aucune information supplémentaire puisque l'effectif optimal n

est relativement stable, ce dernier correspondant à 16. En regard de ces résultats, 25 mesures ont été réalisées sur les dalles testées subséquentement. Les essais au marteau Schmidt sur les dalles correspondent au centre des 25 carrés du quadrillage de 5×5 (voir figure 4.2).

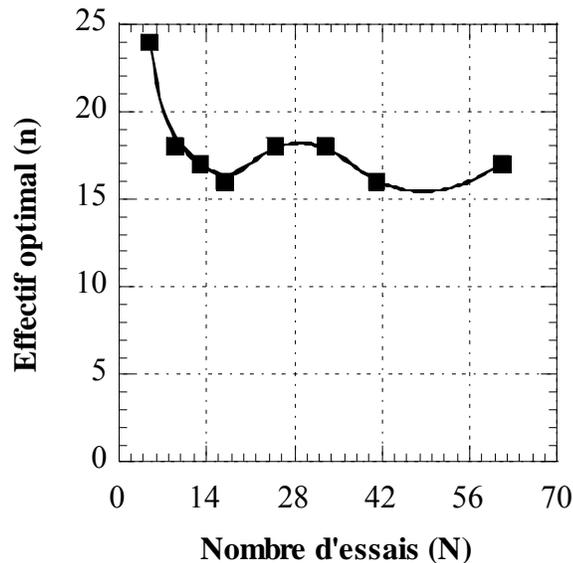


Figure 4.8 – Étude statistique du nombre d'essais à réaliser pour le marteau Schmidt

4.4.1.2 Détermination des paramètres initiaux de l'essai accéléré de cohésion

Dans un premier temps, les espacements requis entre les essais ont été déterminés. Au départ, les espacements recommandés pour l'essai pull-out foré ont été employés. La norme ASTM C900 [1999], qui régit l'essai pull-out foré, exige des espacements qui correspondent à 4 fois et 8 fois le diamètre de la tête de l'ancrage respectivement entre un forage et le rebord de l'élément à caractériser et entre chaque forage. Toutefois, les essais ont permis d'établir que des espacements plus élevés sont nécessaires avec les ancrages employés. Ainsi, plutôt que de tenir compte du diamètre de la tête de l'ancrage (D_t) comme référence, la profondeur de forage a été utilisée et les mêmes facteurs d'amplification que pour l'essai pull-out foré ont été considérés.

Dans un second temps, les essais préliminaires ont permis de déterminer le temps de polymérisation de l'adhésif époxy. Selon les recommandations du manufacturier, la période

de polymérisation est de 50 minutes. Toutefois, après avoir effectué plus d'une vingtaine d'essais, une période d'attente d'environ 2 heures a été observée entre la mise en place de l'ancrage avec l'adhésif et l'application de la charge. De plus, l'adhésif époxy permet d'effectuer des essais sur des surfaces verticales ou en surplomb. En effet, sa texture assure une adhérence suffisante pour permettre le maintien de l'ancrage (tige filetée) dans le forage.

Dans un troisième temps, les essais préliminaires ont permis de constater que l'augmentation de la profondeur de forage entraîne une plus grande variabilité des forces mesurées, comme le montre la figure 4.9. Comme tout essai de caractérisation, pour considérer que les valeurs mesurées sont représentatives de l'élément à évaluer, un faible coefficient de variation doit être obtenu. En supposant qu'un coefficient de variation inférieur à 15 % est préférable pour considérer l'essai accéléré de cohésion comme une méthode procurant une évaluation adéquate du béton, les profondeurs de forage à évaluer seraient de 15 mm et de 20 mm.

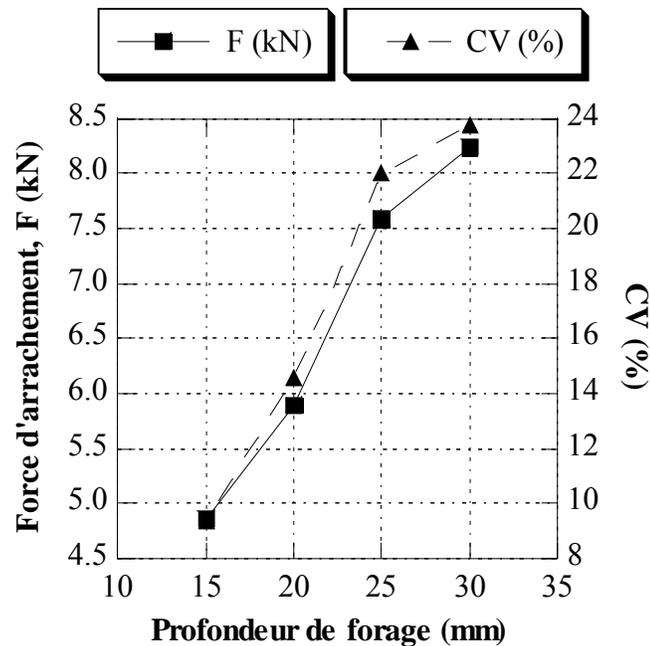


Figure 4.9 – Influence de la profondeur de forage sur la force d'arrachement avec les ancrages CH2

Les résultats du tableau 4.4 permettent également de constater qu'une profondeur de forage inférieure à 15 mm entraîne une variabilité élevée des mesures. En effet, un coefficient de variation de 52,5 % a été obtenu avec les ancrages CH2 (9,5 mm) pour une profondeur moyenne de forage de 11 mm. Puisque les bétons utilisés pour tous ces essais étaient composés de gros granulats de 2,5/10 mm, il semble préférable d'utiliser une profondeur de forage comprise entre 1,5 fois et 2,0 fois le diamètre maximal du gros granulat, soit 10 mm, ou le diamètre de la tige filetée, soit 9,5 mm. Les essais accélérés de cohésion, présentés à la section 4.4.2, ont donc été réalisés pour des profondeurs de forage de 15 mm et 20 mm.

Les essais préliminaires ont également démontré que les ancrages mécaniques ne représentent pas un choix idéal pour l'essai à développer, en dépit de leur simplicité d'installation. Deux principales raisons permettent d'expliquer l'utilisation des ancrages chimiques lors des essais principaux, pour des profondeurs de forage de 15 mm et 20 mm. Premièrement, pour la grande majorité des essais réalisés avec les ancrages mécaniques, la partie insérée dans le béton demeure emprisonnée après l'essai. En effet, une fois la force d'arrachement maximale atteinte, la force mesurée a diminué et est demeurée constante jusqu'à ce que la course du vérin hydraulique de l'appareil de traction soit atteinte. L'emprise de l'ancrage dans le béton peut s'expliquer par l'augmentation de l'ouverture de la partie expansive suite à l'endommagement du béton et à un faible déplacement de la tige. Une représentation d'un essai avec un ancrage MC1, pour une profondeur de forage de 20 mm, est présentée sur la figure 4.10. Les forces qui correspondent à cet état représentent environ 64% de la force d'arrachement maximale pour l'ancrage MC1 et entre 56% et 61% pour l'ancrage MC2. Deuxièmement, l'application d'un couple de torsion afin de fixer l'ancrage au béton représente un inconvénient majeur. En effet, l'objectif principal est d'évaluer des surfaces préparées, susceptibles de présenter un endommagement. Or, le couple de torsion appliqué peut, s'il est important, endommager localement le béton et entraîner une sous-évaluation de sa résistance.

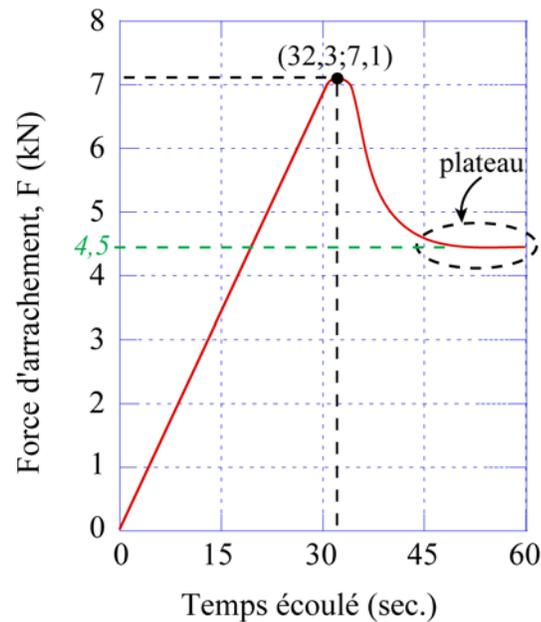


Figure 4.10 – Évolution de la force d'attachement pour un ancrage MCI

4.4.2 Essais principaux sur dalles de béton coulé

4.4.2.1 Détermination des paramètres optimaux de l'essai accéléré de cohésion

Afin de déterminer le diamètre minimal de l'ancrage et la profondeur minimale de forage permettant de tirer une information valable de l'essai accéléré de cohésion, les forces d'arrachement et les cônes de rupture obtenus pour les différents cas étudiés ont été comparés et analysés.

Détermination du diamètre optimal de l'ancrage

Les résultats des essais présentés sur la figure 4.11 indiquent la force d'arrachement moyenne et le coefficient de variation obtenus selon le diamètre de l'ancrage et la profondeur de forage, valeurs indiquées entre parenthèses. Pour une même profondeur de forage, l'ancrage CH2 (9,5 mm) permet d'obtenir une force d'arrachement plus élevée que l'ancrage CH1 (6,4 mm). De plus, les résultats de l'ancrage CH2 sont beaucoup moins variables que ceux avec l'ancrage CH1, et ce, peu importe la profondeur de forage. Les différences entre les résultats des ancrages CH1 et CH2 s'expliquent par la surface de contact de l'adhésif entre le béton et la tige filetée, qui est plus élevée dans le cas de

l'ancrage CH2, puisque le diamètre de la tige est plus grand. Ainsi, pour une même force appliquée, la contrainte de cisaillement qui sollicite l'adhésif est plus faible avec l'ancrage CH2. L'ancrage CH2 est donc celui qui sera utilisé lors des essais ultérieurs.

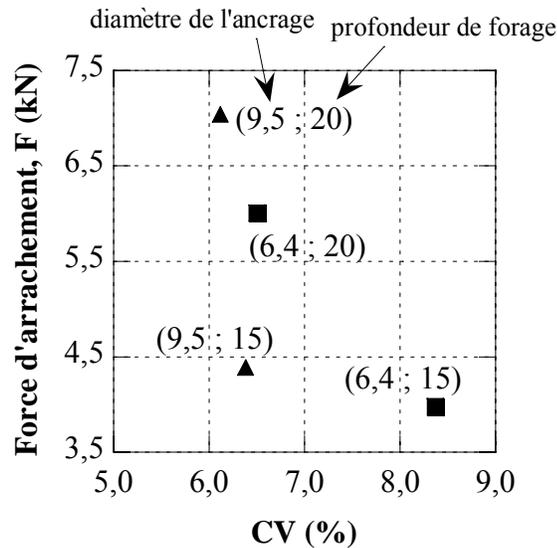


Figure 4.11 – Influence du diamètre de la tige filetée et de la profondeur de forage sur les résultats obtenus avec l'essai accéléré de cohésion

Les résultats de la figure 4.11 ne permettent toutefois pas de déceler une différence significative entre les deux profondeurs de forage testées avec l'ancrage CH2. Les coefficients de variation et le nombre de ruptures par cône sont pratiquement similaires. Afin de déterminer la profondeur idéale, la variabilité des cônes de rupture a été évaluée.

Profondeur optimale de forage : évaluation des cônes de rupture

À partir des valeurs présentées dans le tableau 4.7, une surface équivalente ($S_{\text{équiv}}$) de rupture a été calculée pour avoir une idée de la contrainte de rupture du béton. Le cône le plus près de la surface n'a pas été pris en compte dans l'analyse, puisqu'il est formé par la propagation des fissures après l'atteinte de la force d'attachement maximale. La surface équivalente a été obtenue en prolongeant le cône inférieur jusqu'à la surface de l'échantillon et en déduisant la surface occupée par la tige filetée. La figure 4.12 présente les équations utilisées pour évaluer les surfaces et les volumes des cônes de rupture.

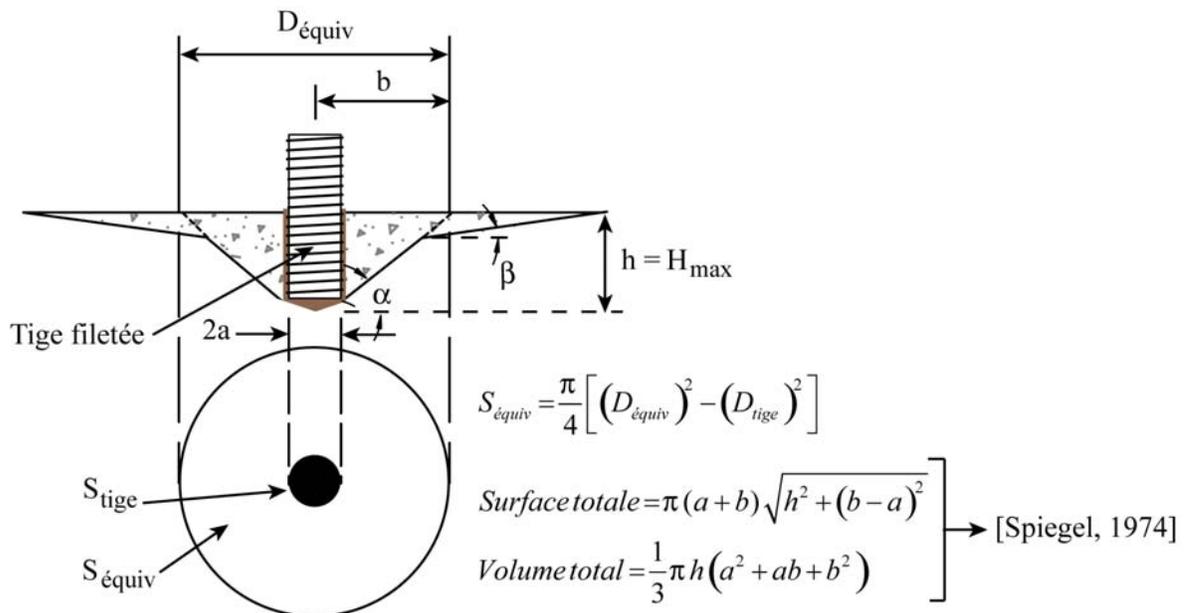


Figure 4.12 – Surface de rupture prise en compte dans l'estimation des contraintes

Les valeurs moyennes des paramètres caractérisant les ruptures par cône pour l'ancrage CH2 sont présentées dans le tableau 4.12. La contrainte estimée à partir de la surface équivalente y est également indiquée. Comme il est possible de le constater, les paramètres évalués pour le béton C3 sont moins variables pour une profondeur de forage de 15 mm comparativement à une profondeur de 20 mm. Toutefois, les coefficients de variation sont tout de même très élevés. Il en est ainsi puisque la surface de rupture du béton est fonction du chemin emprunté par les fissures, dépendant des mécanismes d'arrêt qu'elles rencontrent.

Les principaux mécanismes d'arrêt des fissures sont les granulats, qui agissent comme des défauts. Lors de la rencontre d'un granulat, le rayon de courbure en pointe de fissure est augmenté et les concentrations de contraintes sont réduites, arrêtant ainsi la progression de la fissure. De plus, la présence du granulat accroît le travail nécessaire afin de faire avancer la fissure, puisqu'elle doit contourner le granulat s'il n'est pas fracturé, augmentant la surface de rupture [Van Mier, 1997]. Ces mécanismes d'arrêt des fissures seront effectifs jusqu'au moment où la longueur des fissures atteint la longueur critique (l_c). S'en suivra

ensuite une propagation instable des fissures et la ruine du matériau. Les surfaces de rupture sont donc dépendantes des mécanismes d'arrêt de propagation que les fissures rencontrent, d'où la grande variabilité de celle-ci et la difficulté d'évaluer une contrainte qui soit représentative de la cohésion de la surface du béton.

Tableau 4.12 – Valeurs moyennes des paramètres évalués pour les cônes mesurés avec l'ancrage CH2

Béton / profondeur de forage		C3 / 15 mm	C3 / 20 mm	C1 / 20 mm
Force d'arrachement	(kN)	4,4 (6,4)	7,1 (6,1)	5,5 (11)
α	(°)	22 (19)	24 (38)	30 (24)
β	(°)	11,5 (10)	15,3 (58,3)	15,2 (34)
D_{equiv}	(mm)	82 (20)	108 (40)	65 (39)
Surface totale	(mm ²)	11281 (26)	18359 (53)	8060 (85)
Volume total	(mm ³)	46505 (31)	103068 (54)	35511 (109)
S_{equiv}	(mm ²)	5448 (38)	10269 (75)	3708 (94)
Contrainte estimée	(MPa)	0,93 (45)	1,17 (80)	2,17 (47)

Note : les nombres entre parenthèses indiquent le coefficient de variation exprimé en pourcentage.

Malgré le fait que les surfaces évaluées soient très variables, les forces d'arrachement maximales des essais présentés dans le tableau 4.12 le sont beaucoup moins. De plus, pour la même profondeur de forage, soit 20 mm, une force d'arrachement plus élevée a été mesurée avec le béton C3 comparativement au béton C1. Ces résultats vont dans le même sens que les essais de compression et de traction par fendage, ces derniers ayant démontré que le béton C3 est plus résistant que le béton C1. La force d'arrachement maximale semble donc procurer une bonne évaluation de la cohésion du béton puisque les résultats sont peu variables et qu'ils sont proportionnels aux résistances évaluées en compression et en traction par fendage. De plus, les résultats obtenus démontrent des variabilités semblables pour les profondeurs de forages de 15 et 20 mm.

L'analyse des cônes de rupture a démontré dans l'ensemble une plus faible variabilité des paramètres pour une profondeur de forage de 15 mm plutôt que de 20 mm. De plus, étant donné que les observations au microscope binoculaire dans le Chapitre 3 ont démontré que les fissures engendrées par la préparation de surface sont principalement localisées près de la surface (voir Annexe C), alors une profondeur de forage de 15 mm a été adoptée pour les tests subséquents. L'espacement entre un forage et le rebord de l'élément à caractériser est donc de 60 mm et celui entre chaque forage est de 120 mm. L'ancrage qui sera utilisé est le CH2, soit l'ancrage chimique avec la tige filetée de 9,5 mm de diamètre. La figure 4.13 permet de visualiser ce à quoi ressemble un essai accéléré de cohésion.

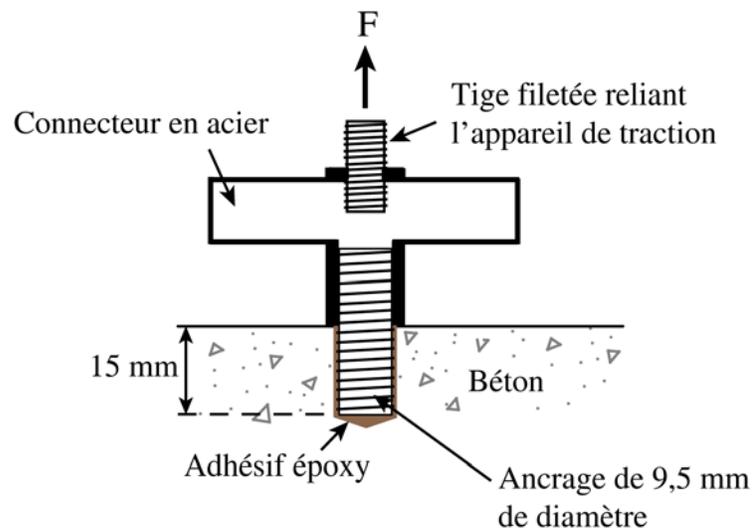


Figure 4.13 – Essai accéléré de cohésion

4.4.2.2 Comparaison des méthodes d'évaluation

Les résultats récapitulatifs de chacune des méthodes d'évaluation, et pour les deux types de béton utilisés, sont présentés dans le tableau 4.13. Pour les essais normalisés de compression et de traction par fendage, les résultats sur des cylindres de béton âgés de 123 jours sont indiqués, âge auquel les essais ont été réalisés sur les dalles. Les résultats des essais de cohésion en traction et des essais accélérés de cohésion sont ceux obtenus respectivement pour des profondeurs de carottage et de forage de 20 mm. Une profondeur de 20 mm a été utilisée pour ces deux essais afin de pouvoir les comparer avec l'essai

pull-out foré, dont la hauteur du cône de béton sollicité est de 20 mm. De plus, des ancrages chimiques de 9,5 mm de diamètre ont été utilisés pour l'essai accéléré de cohésion.

Tableau 4.13 – Résultats récapitulatifs des essais sur les dalles de béton coulé

Méthode	Essai de compression			Essai de traction		
	Marteau Schmidt	Pull-out foré	f_c	Cohésion en traction	f_{st}	Essai accéléré de cohésion
Nombre d'essais	25	8	3	8	3	8
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(kN)
Béton C1	28,3 (6,0)	30,0 (8,4)	34,1 (7,5)	3,27 (3,7)	3,22 (7,8)	5,54 (11,3)
Béton C3	29,2 (9,6)	33,7 (10,5)	43,9 (14,9)	3,93 (4,9)	3,63 (2,4)	7,04 (6,1)

Note : les nombres entre parenthèses indiquent le coefficient de variation exprimé en pourcentage.

Les résultats présentés dans le tableau 4.13 semblent indiquer que les essais in situ qui évaluent la résistance en compression du béton sont influencés par la taille des granulats. En effet, les valeurs mesurées sont beaucoup plus faibles pour le béton C3 comparativement aux résistances obtenues avec l'essai de compression usuel. Alors que des valeurs de 29,2 MPa et 33,7 MPa sont mesurées respectivement avec le marteau Schmidt et l'essai pull-out foré, la résistance en compression sur les cylindres est de 43,9 MPa.

Pour l'essai au marteau Schmidt, deux facteurs semblent être responsables de la grande différence des valeurs mesurées comparativement à l'essai de compression normalisé : l'épaisseur et la stabilité de l'élément. Dans un premier temps, il est fort possible qu'une épaisseur de 80 mm ne soit pas suffisante pour permettre une propagation totale de l'onde. L'énergie absorbée par le béton est donc moins grande, entraînant un indice de rebondissement plus faible. Dans un second temps, puisque le dessous des dalles n'était pas uniforme, il est possible qu'un léger déplacement de l'élément soit survenu lors des essais au marteau Schmidt, réduisant ainsi l'indice de rebondissement. Neville [2000] mentionne d'ailleurs l'importance de la stabilité de l'élément lors des essais pour obtenir une évaluation adéquate.

Dans le cas de l'essai pull-out foré, il est probable que la table de calibration établie entre la force d'arrachement et la résistance en compression du béton ne convient pas parfaitement aux bétons utilisés, principalement pour le béton C3. Les essais de Bungey et Soutsos [2001] démontrent d'ailleurs que les résistances en compression évaluées avec la courbe de calibration de l'essai pull-out foré ne procure pas une évaluation convenable pour tous les bétons.

L'essai de cohésion en traction est la méthode de caractérisation in situ qui semble procurer des résistances qui se rapprochent le plus d'un essai normalisé, en l'occurrence l'essai de traction par fendage. En effet, les valeurs obtenues avec l'essai de cohésion en traction sont supérieures à celles de l'essai de traction par fendage de seulement 1,6% et 8,3% respectivement pour le béton C1 et le béton C3. Pour sa part, l'essai accéléré de cohésion démontre un comportement similaire à l'essai de cohésion en traction, la force moyenne pour le béton C3 étant plus élevée que celle du béton C1, soit 7,04 kN comparativement à 5,54 kN. De plus, le coefficient de variation le plus élevé, obtenu avec le béton C1, n'est que de 11,3%. L'essai accéléré de cohésion permet donc de distinguer deux bétons de résistances différentes et il démontre une bonne reproductibilité.

Les essais réalisés avec les trois méthodes d'évaluation in situ démontrent également une influence de la taille de la pierre sur les plans de rupture. Non seulement les plans de rupture présentent plus d'irrégularités avec le gros granulats de plus grande dimension (béton C1), mais des granulats non fracturés sont présents parfois dans le plan de rupture. L'irrégularité des plans de rupture peut s'expliquer par l'hétérogénéité du béton C1. En effet, selon Neville [2000], malgré le fait que des granulats de grande dimension permettent de réduire le rapport E/C et d'augmenter la résistance mécanique, deux facteurs viennent contrer le gain de résistance. D'une part, Neville mentionne que de plus grandes contraintes aux interfaces pâte/granulats sont présentes suite aux variations de volume, diminuant ainsi la liaison de l'interface. D'autre part, Neville souligne que des discontinuités plus importantes sont formées entre les granulats et la pâte de ciment. Ainsi, plutôt que de

fracturer le granulat, la fissure le contourne puisque le lien à l'interface pâte/granulat est plus faible comparativement à la résistance du granulat.

4.4.3 Essais sur supports préparés

4.4.3.1 Comparaison des méthodes d'évaluation

Les résultats moyens obtenus pour les trois méthodes de caractérisation sur les supports préparés sont présentés dans le tableau 4.14. Pour les préparations NAT et SAB, les résultats représentent la moyenne de tous les essais réalisés sur les trois supports.

Tableau 4.14 – Résultats récapitulatifs des essais réalisés sur les supports préparés

Préparation	Essai au marteau Schmidt		Essai accéléré de cohésion		Essai de cohésion en traction	
	Contrainte moyenne (MPa)	CV (%)	Force moyenne (kN)	CV (%)	Contrainte moyenne (MPa)	CV (%)
NAT	47,8 (60)	8,8	5,29 (24)	8,2		
SAB	48,8 (60)	10,9	5,33 (24)	9,6		
MP9	25,5 (25)	29,2	4,98 (12)	24,7	2,13 (4)	19,8
MP11	21,2 (25)	35,0	4,85 (12)	18,0	2,25 (4)	29,6
MP34	24,1 (25)	32,6	4,91 (12)	24,9	1,60 (4)	25,4

Note : le nombre de tests réalisé pour chacun des essais est indiqué entre parenthèses.

Les résultats du tableau 4.14 démontrent une diminution de la résistance des surfaces MP comparativement aux surfaces NAT et SAB, qui s'accompagnent également d'une variabilité plus élevée, signe de la présence d'un endommagement. Toutefois, les résultats des essais au marteau Schmidt et des essais accélérés de cohésion ne démontrent pas une réduction proportionnelle à l'augmentation du poids du marteau, comparativement aux essais de cohésion en traction. Ces différences peuvent s'expliquer par la surface sollicitée lors de l'essai, qui intègre de façon implicite davantage de défauts pour l'essai de cohésion en traction, étant donné la taille de la pastille. Toutefois, puisque le nombre d'essais réalisé

est relativement limité pour cette méthode de caractérisation, une certaine prudence est appelée quant aux résultats obtenus.

Dans le cas du marteau Schmidt, deux facteurs peuvent expliquer l'absence d'une relation entre le poids du marteau pneumatique et la résistance de la surface préparée : l'absence d'essais réalisés dans la zone sollicitée par la pointe du marteau pneumatique, l'extrémité du marteau Schmidt étant plus grande que cette zone, et la sensibilité de l'essai aux irrégularités de la surface. Dans le cas de l'essai accéléré de cohésion, il s'agirait plutôt du choix subjectif de l'emplacement des essais réalisés hors de la zone sollicitée par la pointe du marteau pneumatique.

Les résultats du tableau 4.14 démontrent une fois de plus que l'essai de cohésion en traction reflète bien l'influence de l'augmentation du poids du marteau pneumatique sur la résistance de la surface préparée. Toutefois, l'essai accéléré de cohésion et l'essai au marteau Schmidt affichent un potentiel intéressant pour l'évaluation in situ puisqu'ils requièrent peu d'outillage et qu'ils peuvent être réalisés en peu de temps pour tout type de surface (horizontale, verticale ou surplombante). Une étude plus approfondie a donc été entreprise afin de proposer une méthode d'analyse des résultats obtenus pour les essais accélérés de cohésion et les essais au marteau Schmidt sur des surfaces préparées.

4.4.3.2 Proposition d'une méthode d'analyse

Le but de cette section est de proposer une méthode d'analyse des résultats obtenus respectivement avec l'essai accéléré de cohésion et le marteau Schmidt. L'approche qui est suggérée est de réaliser une étude statistique des résultats et d'en exploiter certains paramètres afin d'établir un critère d'acceptation de la préparation de surface. Par exemple, selon le CPCA [1998], pour garantir statistiquement que la résistance moyenne de trois essais consécutifs sera respectée dans 99 % des cas, la valeur minimale permise est établie ainsi :

$$\bar{f}_c \geq f'_c + 1,4\sigma \text{ pour } \sigma > 3,5 \text{ MPa} \quad (5)$$

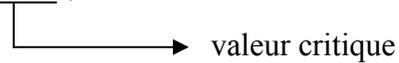
ou

$$\bar{f}_c \geq f'_c + (2,4\sigma - 3,5) \text{ pour } \sigma \leq 3,5 \text{ MPa} \quad (6)$$

Dans le cadre du présent travail, de telles équations ne peuvent être déduites puisque la résistance caractéristique du béton est inconnue. Il s'agirait plutôt de déterminer une valeur critique (valeur minimale) évaluée sur une surface saine, pour laquelle la probabilité d'occurrence sur une surface préparée serait inférieure ou égale à cette valeur critique, tel qu'exprimé dans l'équation 7.

$$P(X \leq \underbrace{\mu - M\sigma}) < Y \quad (7)$$

où :



X = résistance évaluée sur une surface préparée;

μ = résistance moyenne des essais sur une surface saine;

M = facteur d'amplification;

σ = écart-type des essais sur une surface saine;

Y = probabilité d'occurrence critique (%).

Afin d'établir une équation telle que celle présentée précédemment, les paramètres μ et σ , évalués à partir d'essais réalisés sur une surface saine, doivent d'abord être déterminés. Dans le cadre de ce travail, sur la foi des résultats présentés dans le Chapitre 3, les essais compilés des surfaces NAT et SAB ont été considérés comme ceux représentant l'état d'une surface saine. Les probabilités d'occurrence des surfaces MP ont été évaluées pour quatre valeurs critiques ($\mu - M\sigma$). Ces probabilités d'occurrence sont obtenues par l'entremise d'une table de distribution normale standard $N(0,1)$ [D.C. Montgomery et G.C. Runger, 1999] pour laquelle la distribution est définie comme suit:

$$\phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}z^2} \quad \text{où } Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (8)$$

Le tableau 4.15 présente les résultats de cette étude statistique pour les essais accélérés de cohésion, alors que le tableau 4.16 montre les valeurs obtenues pour les essais au marteau Schmidt.

Tableau 4.15 – Probabilité d’obtenir une valeur inférieure ou égale à la valeur critique établie selon les paramètres μ et σ des essais combinés des surfaces NAT et SAB pour l’essai accéléré de cohésion

Valeur critique (kN)	P (X ≤ valeur critique)				
	NAT	SAB	MP9	MP11	MP34
$\mu - 1\sigma = 4,84$	14,8 %	17,1 %	45,5 %	49,4 %	47,7 %
$\mu - 2\sigma = 4,37$	1,7 %	3,1 %	31,1 %	29,0 %	33,0 %
$\mu - 3\sigma = 3,90$	0,1 %	0,3 %	19,1 %	13,8 %	20,5 %
$\mu - 4\sigma = 3,43$	0,0 %	0,0 %	10,4 %	5,2 %	11,4 %

Tableau 4.16 – Probabilité d’obtenir une valeur inférieure ou égale à la valeur critique établie selon les paramètres μ et σ des essais combinés des surfaces NAT et SAB pour l’essai au marteau Schmidt

Valeur critique (kN)	P (X ≤ valeur critique)				
	NAT	SAB	MP9	MP11	MP34
$\mu - 1\sigma = 43,5$	16,0 %	15,2 %	99,2 %	99,9 %	99,3 %
$\mu - 2\sigma = 38,7$	2,9 %	1,5 %	96,2 %	99,1 %	96,8 %
$\mu - 3\sigma = 33,9$	0,3 %	0,0 %	87,1 %	95,6 %	89,4 %
$\mu - 4\sigma = 29,1$	0,0 %	0,0 %	68,7 %	85,7 %	73,9 %

À partir de ces résultats, il pourrait être possible de vérifier si la probabilité d’occurrence critique pour une valeur critique choisie est respectée. Toutefois, dans le cadre de ce travail, étant donné que les emplacements retenus pour la réalisation des mesures avec l’essai accéléré de cohésion et le marteau Schmidt étaient biaisés (essais réalisés hors de la zone sollicitée par la pointe du marteau pneumatique), il serait imprudent de proposer une probabilité d’occurrence fixe pour une certaine valeur critique établie. Des essais plus élaborés se doivent d’être réalisés en laboratoire afin de vérifier quels paramètres

permettent de discriminer une surface apte ou non à recevoir une réparation (voir section 4.5). Par exemple, si la valeur critique choisie pour l'essai accéléré de cohésion est $\mu - 3\sigma$ et que la probabilité d'occurrence critique établie pour l'essai accéléré de cohésion est de 20 %, l'équation 7 deviendrait alors :

$$P(X \leq \mu - 3\sigma) \leq 20\% \quad (9)$$

Dans ce cas, la préparation MP34 ne serait pas acceptée et la préparation de surface devrait se poursuivre jusqu'au respect du critère d'acceptation défini par l'équation précédente. La figure 4.14 présente la distribution normale générale des essais accélérés de cohésion pour chacune des surfaces préparées ainsi que la répartition des essais par rapport à la valeur critique $\mu - 3\sigma$ (3,9 kN).

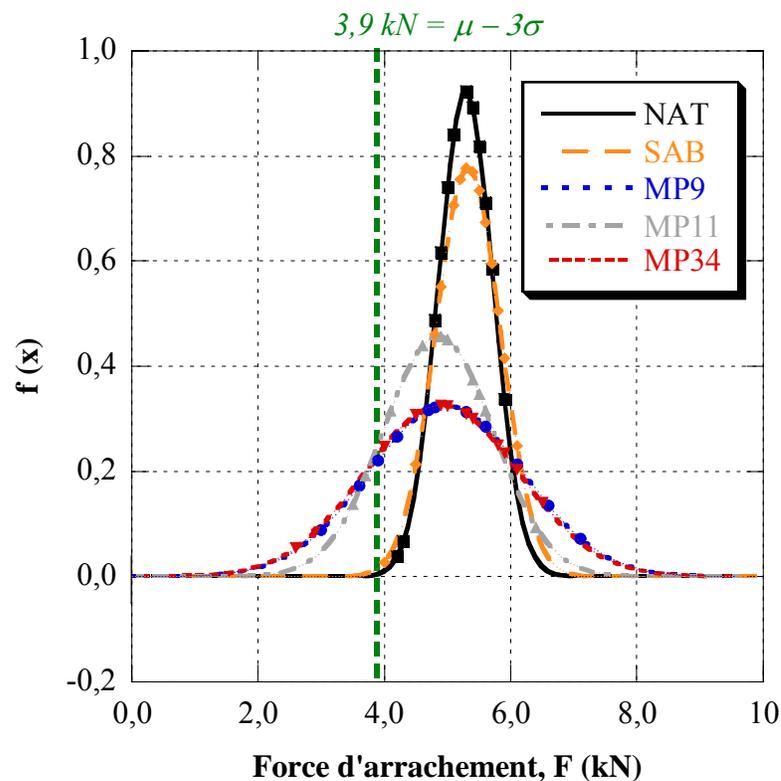


Figure 4.14 – Distribution normale générale des essais accélérés de cohésion

Il est à noter que le nombre d'essais accélérés de cohésion réalisé sur les supports a été limité à 12, l'espace disponible étant restreint. Toutefois, considérant la simplicité et la

rapidité de l'essai accéléré de cohésion ainsi que la conclusion de l'étude statistique pour l'essai au marteau Schmidt (voir section 4.4.1.1), il est recommandé de réaliser 25 essais in situ. Ainsi, puisque les espacements requis entre chaque point d'essai et entre un point d'essai et le bord libre d'un élément sont respectivement de 120 mm et 60 mm, alors une surface minimale de 600 mm × 600 mm sera sollicitée. La figure 4.15 présente la procédure de l'essai accéléré de cohésion qui serait à suivre afin de déterminer si une surface est apte à recevoir une nouvelle chape de béton.

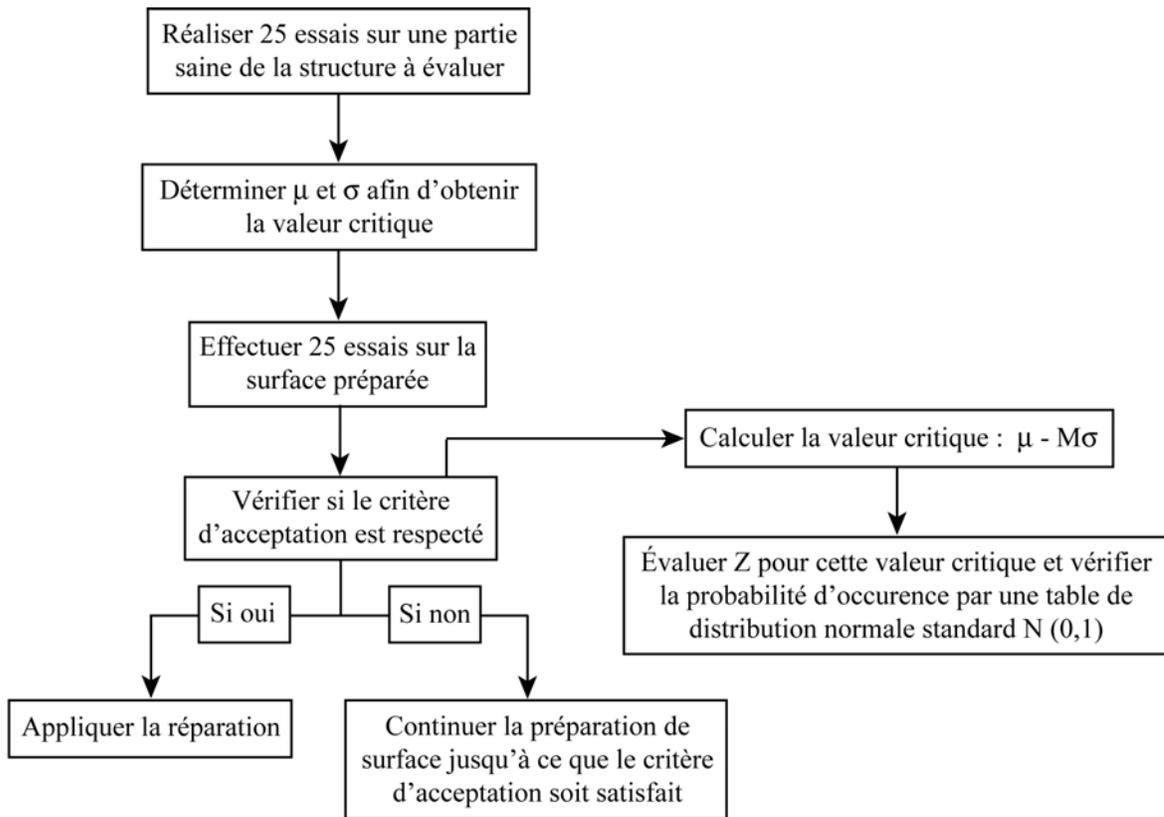


Figure 4.15 – Schéma de la procédure d'essai pour évaluer la qualité de la préparation de surface à partir d'essais accélérés de cohésion et au marteau Schmidt

4.5 Conclusion

Dans un premier temps, les essais réalisés sur les dalles de béton coulé ont permis de développer une méthode de caractérisation quantitative des surfaces préparées en béton, soit l'essai accéléré de cohésion. Cet essai est réalisé à l'aide d'une tige d'acier de 9,5 mm de diamètre et collée à l'aide d'un adhésif époxy dans un forage de 15 mm de profondeur

dans le béton à évaluer. Les espacements requis sont 60 mm et 120 mm respectivement entre un forage et le bord de l'élément à caractériser et entre chaque forage. L'essai accéléré de cohésion peut être réalisé en peu de temps, environ 2 heures, et sur divers types de surface, peu importe l'orientation de celle-ci.

Les essais réalisés sur les dalles de béton coulé ont également consisté à vérifier le potentiel de l'essai accéléré de cohésion ainsi que celui de trois autres méthodes de caractérisation quantitative pour évaluer la résistance du béton sain, soit l'essai au marteau Schmidt, l'essai de pull-out foré et l'essai de cohésion en traction. L'essai de cohésion en traction et l'essai accéléré de cohésion ont été en mesure de distinguer deux bétons caractérisés par des propriétés mécaniques différentes. Toutefois, la faible différence entre les résistances en compression évaluées pour les deux bétons avec les essais au marteau Schmidt et pull-out foré démontre leur limitation quant à l'évaluation de la résistance d'un béton sain.

Dans un second temps, l'essai accéléré de cohésion a été testé sur des supports préparés et comparé avec des essais au marteau Schmidt et de cohésion en traction. Les essais semblent montrer que l'essai de cohésion en traction donne une indication plus significative de l'état de la surface préparée que les essais accélérés de cohésion et ceux au marteau Schmidt. Toutefois, étant donné le nombre limité d'essais de cohésion en traction, une certaine prudence est appelée quant aux résultats obtenus. De plus, il apparaît que l'influence du poids du marteau pneumatique pour les essais accélérés de cohésion et ceux au marteau Schmidt soit difficilement notable. Cependant, cette observation pourrait être attribuable au choix subjectif de l'emplacement des essais.

Dans un troisième temps, une méthode d'analyse des résultats obtenus avec les essais accélérés de cohésion et ceux au marteau Schmidt a été proposée. Cette méthode d'analyse consiste à vérifier si la probabilité d'occurrence (Y) des essais réalisés sur une surface préparée (X), pour une valeur critique ($\mu - M\sigma$) dont les paramètres μ et σ sont obtenus sur une surface saine, est respectée telle qu'elle est définie à l'expression suivante :

$$P(X \leq \mu - M\sigma) \leq Y \quad (10)$$

Cependant, davantage d'essais méritent d'être réalisés en laboratoire afin de pouvoir établir la probabilité d'occurrence appropriée pour une certaine valeur critique établie. Pour se faire, des essais accélérés de cohésion, des essais au marteau Schmidt, des essais de cohésion en traction et des essais d'adhérence se doivent d'être réalisés sur divers types de béton. Par la suite, des essais en conditions *in situ* devraient être effectués afin de vérifier ce critère d'acceptation (voir section 7.4).

Chapitre 5 Adhérence des réparations sur surfaces préparées

5.1 Introduction

La revue de documentation a montré que plusieurs projets ont porté sur l'adhérence des réparations. Toutefois, aucun de ces projets n'a été en mesure d'évaluer l'importance de l'intégrité et de la rugosité du substrat. Cette première partie du troisième volet expérimental a donc pour objectif d'évaluer quantitativement l'effet de l'endommagement du substrat sur l'adhérence de la réparation et de vérifier s'il existe une corrélation entre la rugosité de la surface du substrat et l'adhérence de la réparation.

5.2 Méthodologie

Afin d'atteindre l'objectif mentionné précédemment, la rugosité des surfaces préparées, utilisées au premier volet expérimental, a d'abord été évaluée. Par la suite, ces surfaces ont été réparées et des essais d'adhérence ont été réalisés. La méthode utilisée pour quantifier la rugosité des surfaces, les procédures suivies pour la mise en place des réparations sur les supports et les essais d'adhérence sont présentés en détail dans les paragraphes qui suivent.

5.2.1 Paramétrage topographique

L'objectif dans cette partie du travail est d'évaluer quantitativement la rugosité des surfaces préparées sans avoir recours à un prélèvement d'échantillons. Les sections qui suivent présentent la description du procédé utilisé afin de numériser et d'analyser les surfaces.

5.2.1.1 Dispositif de numérisation 3D

Un dispositif de numérisation 3D qui fait appel à la technique du moiré de projection, fabriqué par la compagnie InSpeck, a été utilisé afin de recueillir les données nécessaires pour évaluer la rugosité des surfaces préparées. La géométrie de la surface est obtenue par le traitement des images numérisées de la surface via le logiciel d'analyse. Par la suite, la matrice 3D des points qui définissent la géométrie de la surface est utilisée afin d'évaluer

les paramètres d'état de surface par l'entremise du programme **RugoID³**. Deux types de champ, qui représente la zone couverte par la caméra DTC, étaient disponibles : court et large. Puisque le champ court détecte une surface plus petite que le champ large, la précision des mesures est supérieure. La numérisation des surfaces a donc été réalisée avec le **champ court**. Les caractéristiques des dispositifs de numérisation utilisés lors des essais de la série 1 et de la série 2 sont présentées dans le tableau 5.1.

Tableau 5.1 – Propriétés des dispositifs de numérisation

	Série 1	Série 2
Résolution machine : pixels	640 × 480	1280 × 1024
Surface couverte : largeur (mm) x hauteur (mm)	370 × 275	321 × 257
Profondeur du champ (µm)	450	400
Résolution latérale : x, y	0,60	0,25
Résolution axiale : z	0,50	0,30

5.2.1.2 Application RugoID³

Le traitement des matrices 3D des points qui définissent les surfaces étudiées est réalisé avec l'application **RugoID³**. Ce programme comporte une interface qui peut être utilisée à la fois comme une feuille d'analyse et une base de données permettant la comparaison ultérieure entre les résultats des diverses surfaces analysées. La figure 5.1 donne un aperçu de l'interface utilisateur de cette application.

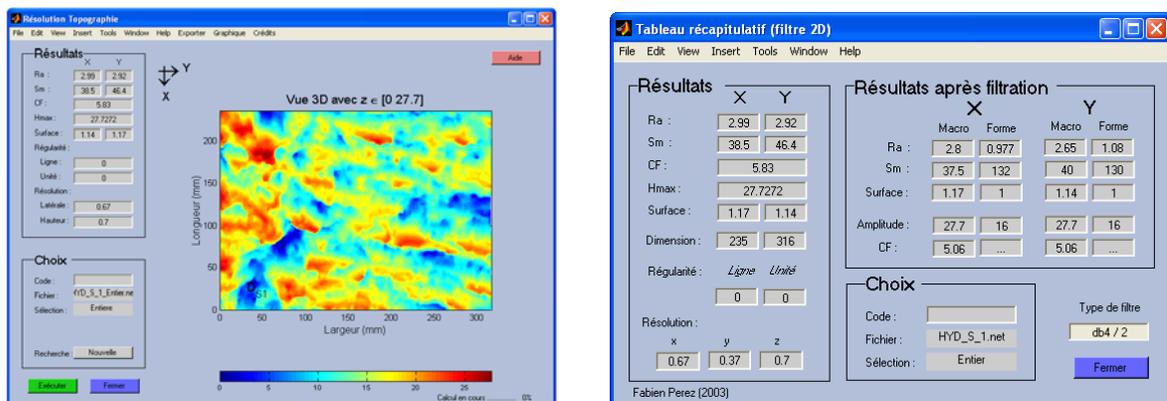


Figure 5.1 – Interface utilisateur de **RugoID³**

Les paramètres d'état de surface obtenus avec l'application **RugoID³** proviennent du traitement des profils de la surface. Un profil de surface correspond à la ligne d'intersection entre une surface et un plan de coupe perpendiculaire à la surface. Il peut être décomposé en plusieurs échelles. Dans le présent projet, la décomposition du profil qui a été retenue est celle présentée à la figure 5.2.

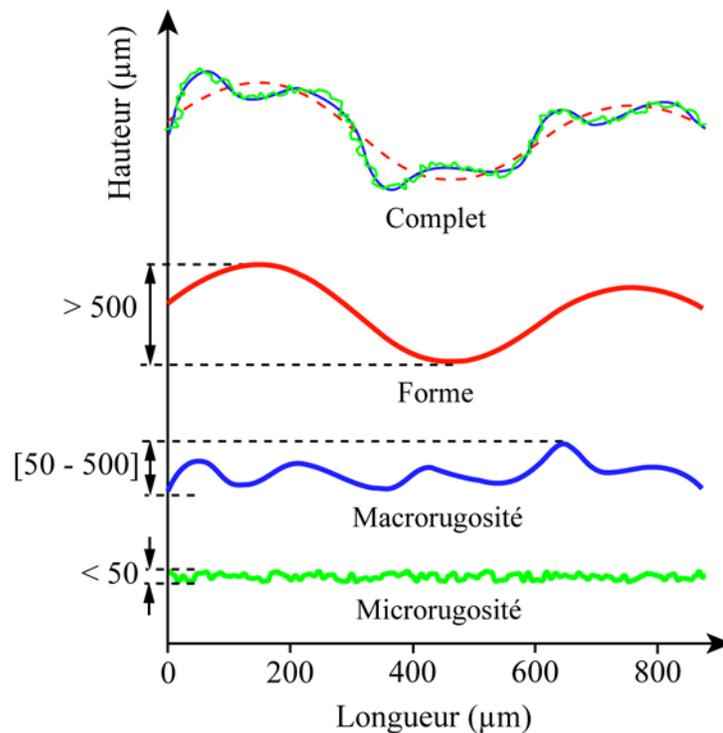


Figure 5.2 – Décomposition d'un profil de surface

Le profil **Complet** correspond au profil de la surface auquel la filtration du bruit a été soustraite. Étant donné la résolution verticale de l'appareil de numérisation et la filtration du bruit, il est impossible de distinguer la microrugosité de la macrorugosité. Par conséquent, le profil **Complet** sera décomposé en deux profils : le profil **Forme** et le profil **Macro**. Le profil **Forme** représente les irrégularités de finition ou de l'inclinaison de la surface, alors que le profil **Macro** fait référence à la macrorugosité engendrée par la préparation de surface. Pour l'étude de la rugosité et son influence sur l'adhérence des réparations, les paramètres évalués à partir du profil **Macro** ont été considérés. Pour le

lecteur désireux d'en savoir davantage sur le traitement des données et le fonctionnement de l'application **RugoID**³, il est suggéré de consulter les travaux de Perez [2005].

5.2.1.3 Paramètres d'état de surface

Le programme **RugoID**³ permet d'évaluer plusieurs paramètres d'état de surface qui caractérisent la rugosité d'une surface. Pour le présent projet, des paramètres physiques (profondeur minimale des saillies, etc.) et statistiques (pas moyen des irrégularités du profil, etc.) ont été utilisés. Ces paramètres sont obtenus en définissant une ligne de référence qui épouse la forme du profil de surface à partir de la méthode des moindres carrés. La figure 5.3 permet de visualiser la ligne de référence d'un profil. Elle représente une ligne moyenne qui divise le profil mesuré de tel sorte qu'à l'intérieur des limites de la longueur de base l , la somme des carrés des écarts (y_i) des pics et des creux à partir de la ligne de référence soit minimale.

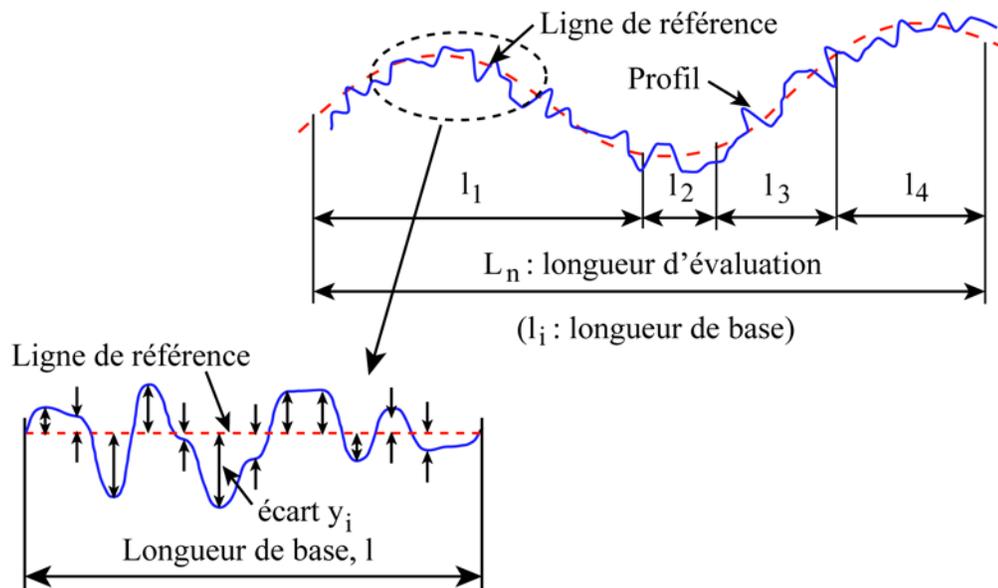


Figure 5.3 – Détermination de la ligne de référence

Les paramètres physiques qui ont retenu l'attention sont les profondeurs des saillies (y_p) et des creux (y_v). Les saillies du profil représentent la partie du profil situé au dessus de la ligne de référence du profil, soit les pics, alors que les creux sont situés sous la ligne de référence. Deux paramètres statistiques ont également été considérés. Il s'agit des

paramètres R_a et S_m , représentés sur la figure 5.4. Le R_a désigne l'écart moyen arithmétique du profil dans les limites de la longueur de la base et est obtenu à partir de la relation suivante :

$$R_a \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i| \quad \text{où } N \text{ représente le nombre de pics et de creux rencontrés}$$

Le paramètre S_m quant à lui détermine le pas moyen des irrégularités du profil sur la longueur de la base. Le pas des irrégularités représente donc la longueur de la ligne de référence contenant une saillie et un creux consécutifs. Le S_m est obtenu à partir de la relation qui suit :

$$S_m \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_{mi} \quad \text{où } N \text{ représente le nombre de pas des irrégularités}$$

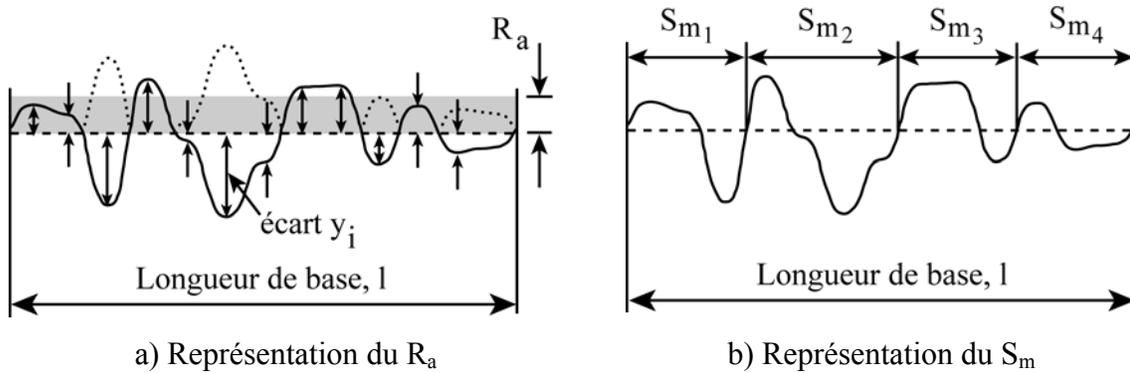


Figure 5.4 – Paramètres d'état de surface

Puisque les paramètres R_a et S_m ont été évalués selon les axes x et y , respectivement la longueur et la largeur des surfaces, alors la moyenne des valeurs sur ces deux axes a été considérée. Un autre paramètre a également été utilisé, soit le paramètre I_{ss} qui représente l'incrément de surface spécifique. Il est obtenu en divisant la surface spécifique (S_s) par la surface géométrique (S_G) d'un élément. La figure 5.5 présente un exemple de ce que signifie ces deux types de surface. L'incrément de surface spécifique permet donc d'avoir une idée de l'augmentation de la surface suite à la préparation de surface. Le paramètre I_{ss} est également évalué dans les deux directions de la surface (x et y) et est obtenu ainsi :

$$I_{ss} = (I_{ss})_x \times (I_{ss})_y = (S_s/S_G)_x \times (S_s/S_G)_y \quad (11)$$

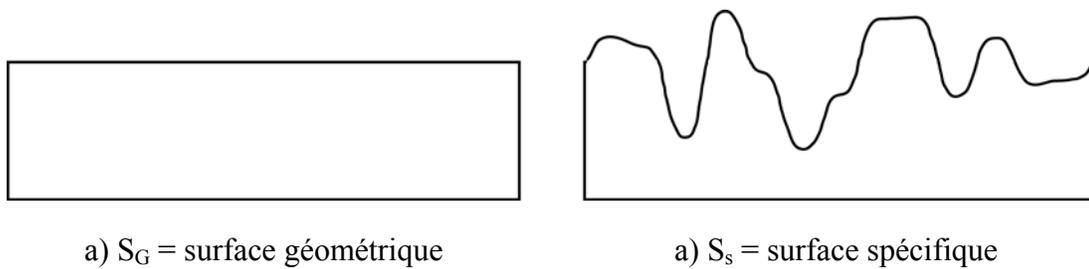


Figure 5.5 – Représentation d’une surface géométrique et d’une surface spécifique

5.2.2 Réparation des supports

Les supports utilisés afin de réaliser les essais d’adhérence ont été réparés avec un béton ordinaire. La composition des bétons de réparation pour les deux séries d’essais est présentée dans le tableau 5.2.

Tableau 5.2 – Composition des bétons de réparation

		Série 1	Série 2
Nombre de gâchée		2	1
E/C		0,40	0,40
Composition par m ³ :			
Ciment T10	(kg)	392	392
Eau	(kg)	159	192
Granulat fin – calcaire	(kg)	752	752
Gros granulat – calcaire (2,5/10 mm)	(kg)	938	938
Agent entraîneur d’air	(ml)	78	78
Superplastifiant			
Polycarboxylate	(ml)	—	980
Naphtalène	(ml)	2744	—

Des coffrages ont été installés sur le pourtour des supports préparés de sorte que l’épaisseur minimale de la réparation soit 75 mm. L’application du béton de réparation a été précédée d’un nettoyage des surfaces préparées à l’aide d’un jet d’eau. Par la suite, un jute humide, recouvert d’un plastique, a été appliqué pendant 24 heures. Ainsi, lors de la mise en place

de la réparation, la surface des supports était dans un état SSS de façon à éviter qu'elle absorbe une trop grande quantité d'eau du matériau de réparation. Dans les cas où il y avait un surplus d'eau, celui-ci a été enlevé à l'aide d'un tissu de coton.

Une aiguille vibrante a été utilisée afin d'assurer une mise en place adéquate des bétons de réparation et éviter la présence de nids d'abeilles. Les surfaces ont été finies à la truelle et recouvertes d'un jute humide et d'une feuille de polyéthylène pendant 24 heures suite à la prise initiale du béton. Après cette période, les coffrages ont été enlevés et une cure humide de 7 jours a été effectuée en maintenant les jutes humides, toujours en les recouvrant d'une feuille de polyéthylène.

Par la suite, les supports réparés ont été placés dans l'entrepôt du laboratoire de béton. Deux séries de réparation ont été réalisées : l'une à l'été 2002 et l'autre à l'automne 2003. Lors de la première série, la consistance du béton de réparation était beaucoup plus élevée que celle désirée. Pourtant, la même formulation que celle des bétons utilisés pour fabriquer les supports avait alors été utilisée. L'augmentation de la consistance du béton a probablement été produite par une quantité de fines plus importantes dans les granulats. La formulation du mélange a donc été modifiée pour obtenir la consistance désirée lors de la seconde série d'essais (voir Annexe A). De plus, pour la seconde série, la surface opposée à celle utilisée lors de la première série a été employée.

5.2.3 Évaluation de l'adhérence des réparations

L'adhérence des réparations a été évaluée en traction, en réalisant des essais pull-off pour des profondeurs de carottage allant au moins jusqu'à 30 mm dans le substrat. La figure 5.6 représente un exemple type d'un essai d'adhérence.

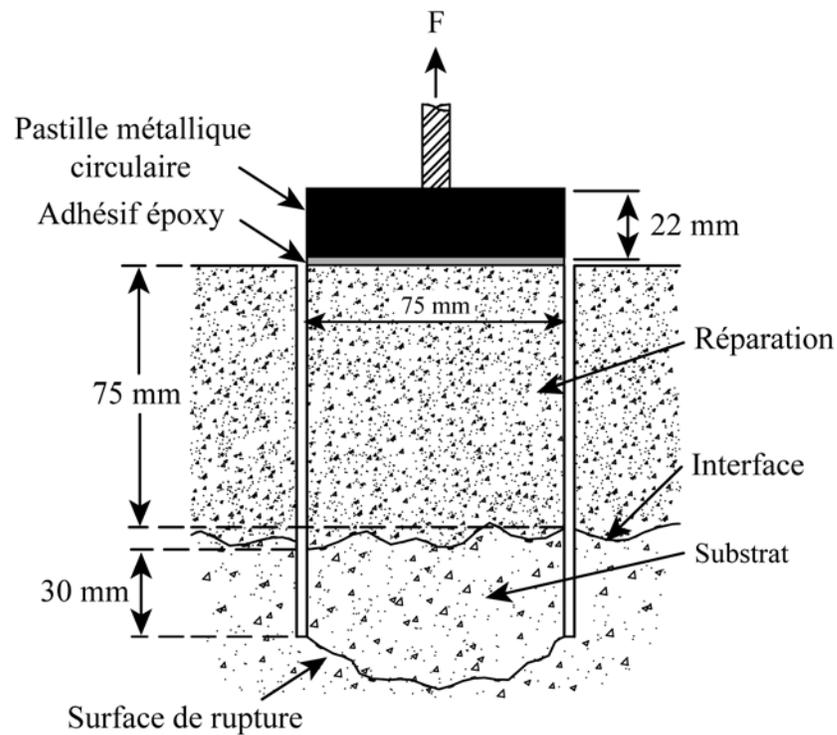


Figure 5.6 – Essai d’adhérence entre un matériau de réparation et un substrat en béton

Afin de s’assurer d’être à la profondeur désirée dans le substrat, la hauteur maximale entre les pics et les creux, fournie par le programme **RugoID**³, a été utilisée. Le tableau 5.3 présente les profondeurs de carottage choisies selon la préparation de surface pour les deux séries d’essais.

Tableau 5.3 – Profondeur moyenne de carottage selon la préparation de surface

	MP7	MP14	MP21	SAB	SCA	HYD	POL	NAT
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
Série 1	117*	119*	132*	106	108	114	105	107
Série 2	120	126	—	110	110	120	—	—

* : le marteau pneumatique est suivi d’un jet de sable pour les essais de la série 1

5.2.4 Caractérisation des matériaux

Divers essais de caractérisation ont été réalisés pour les bétons de réparation appliqués sur les supports en béton. À l'état frais, des essais d'affaissement au cône d'Abrams [ASTM C143, 1999] et de teneur en air [ASTM C231, 1999] ont été effectués quelques minutes après la fin de la séquence de malaxage pour les deux séries de réparation. À l'état durci, le module d'élasticité [ASTM C469, 1999], la résistance en compression [ASTM C39, 1999] et la résistance en traction par fendage (essai « brésilien ») [ASTM C496, 1999] ont été évalués. Ces essais ont été effectués à 7 et 28 jours pour les bétons de réparation de la série 1, et à 40 jours pour le béton de la série 2, soit quelques heures avant la réalisation des essais d'adhérence. Les essais sur bétons durcis ont été réalisés sur des cylindres vibrés de 100 mm × 200 mm. Ils ont été mûris dans un environnement à 23°C et 100 % H.R. jusqu'à l'échéance des essais. Seuls les essais à 28 jours (série 1) et 40 jours (série 2) sont présentés à l'Annexe A.

5.3 Présentation des résultats

Cette section présente les paramètres de rugosité évalués sur les différentes surfaces préparées ainsi que les résultats des essais d'adhérence réalisés sur les mêmes surfaces réparées. Le tableau 5.4 indique les principales caractéristiques mécaniques des bétons utilisés pour les réparations (BO-9, BO-10 et BO-15) et de l'adhésif époxy.

Tableau 5.4 – Propriétés mécaniques des bétons de réparation et de l'adhésif époxy utilisés pour les deux séries d'essais

	BO-9	BO-10	BO-15	Adhésif époxy
Résistance en compression, f_c (MPa)	41,1 (28)	45,3 (28)	41,6 (40)	81 (1)
Résistance en traction, f_{st} (MPa)	3,65 (28)	3,55 (28)	3,38 (40)	24 (14)
Module d'élasticité, E_c (MPa)	30001 (28)	27697 (28)	30967 (40)	5130 (14)

Note : l'âge auquel ont été évaluées les propriétés mécaniques est exprimé en jour entre parenthèses.

5.3.1 Rugosité de surface

La caractérisation de la rugosité des surfaces préparées a été réalisée à l'aide de paramètres d'état de surface définis à la section 5.2.1.3. Il s'agit des paramètres R_a , S_m et I_{ss} . Les valeurs obtenues avec le champ court, pour les différentes surfaces préparées des deux séries d'essais, sont présentées dans le tableau 5.5. Les différences entre les valeurs des paramètres d'état de surface des deux séries d'essais sont attribuables à la résolution de l'appareil de numérisation (voir section 5.2.1.1). En effet, la surface représentative, soit la plus petite surface identifiable, est de 2,0 mm² pour l'appareil utilisé lors de la série 1 comparativement à 0,5 mm² pour l'appareil de la série 2. Le pas entre chaque point caractérisant la surface lors de la seconde série d'essais est donc beaucoup plus faible, augmentant ainsi la précision. Lors de l'analyse des résultats, cet écart entre la précision des mesures des deux séries d'essais devra être pris en compte.

Tableau 5.5 – Valeur des paramètres d'état de surface évalués avec **Rugoid**³

		R_a	S_m	I_{ss}
	Préparation	(mm)	(mm)	
Série 1	NAT	0,84	30,2	1,045
	POL	0,15	15,5	1,020
	SAB	0,67	15,8	1,065
	SCA	0,33	23,7	1,010
	HYD	2,78	33,6	1,205
	MP7S	3,54	84,7	1,075
	MP14S	4,64	68,4	1,180
	MP21S	4,23	65,2	1,145
Série 2	SAB	0,47	6,77	1,145
	SCA	0,53	6,81	1,210
	HYD	3,56	26,9	1,545
	MP7	3,11	36,2	1,280
	MP14	3,20	33,9	1,290

5.3.2 Adhérence des réparations

Les résultats des essais d'adhérence réalisés pour les deux séries d'essais ont permis de constater 5 types de rupture qui se regroupent sous deux catégories : les ruptures cohésives (voir figure 5.7) et les ruptures adhésives (voir figure 5.8).

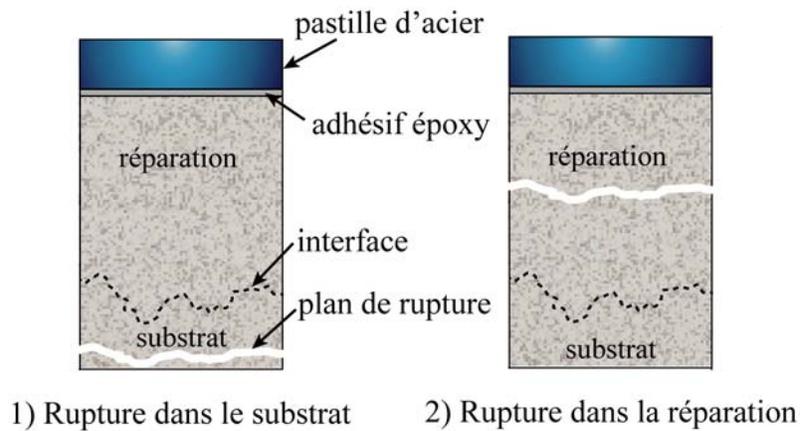


Figure 5.7 – Ruptures cohésives

Des ruptures cohésives ont été observées seulement pour les surfaces NAT et HYD lors de la première série d'essais. Pour la surface NAT, deux ruptures sont survenues dans la réparation et une autre dans le substrat, alors que deux ruptures dans le substrat ont été observées pour la surface HYD.

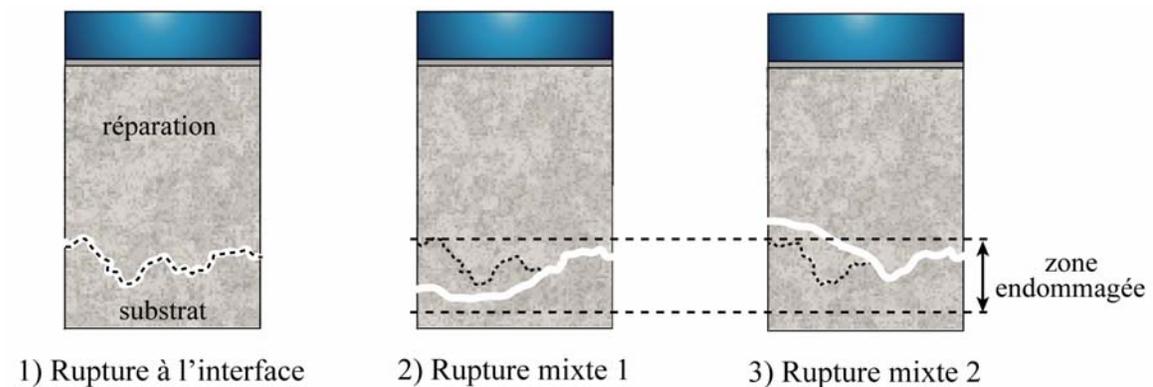


Figure 5.8 – Ruptures adhésives

Pour certains essais où l'adhérence obtenue était faible, des défauts importants ont parfois été identifiés. Par exemple, des vides de compactage ont été observés à l'interface à une reprise pour les surfaces NAT et HYD lors des essais de la série 1. De plus, une fissure perpendiculaire à l'interface et traversant toute la réparation a été constatée dans le cas d'un essai avec la surface MP21S. La fissure a probablement été induite par la propagation d'une fissure présente à la surface du substrat à la suite des travaux de préparation au marteau pneumatique.

Au cours de la série 2, des résidus blanchâtres ont été détectés à l'interface pour un essai sur la surface MP7 et à deux reprises pour la surface MP14. Ces résidus indiquent peut-être la présence d'une plus forte concentration de portlandite et/ou d'ettringite à l'interface. Puisque ces particules sont des produits de l'hydratation du ciment, il est possible que de l'eau soit demeurée emprisonnée dans les creux de la surface dans certains cas malgré l'enlèvement du surplus d'eau avec les tissus de coton. Toutefois, aucune vérification n'a été effectuée à cet égard. Les tableaux 5.6 et 5.7 présentent les résultats des essais d'adhérence selon le type de rupture obtenu.

Tableau 5.6 – Résultats des essais d'adhérence selon le type de rupture pour la série 1

Préparation	Cohésive		Adhésive			Moyenne (MPa)	CV (%)
	Réparation (MPa)	Substrat (MPa)	Interface (MPa)	Mixte 1 (MPa)	Mixte 2 (MPa)		
NAT	1,79 (2)	3,06 (1)	2,21 (2)			2,49	31,8
SAB			2,30 (5)			2,30	10,4
SCA			2,31 (5)			2,31	18,3
HYD		2,97 (2)	2,66 (1)		1,70 (2)	2,40	27,5
MP7S			1,70 (3)	2,04 (2)		1,83	14,1
MP14S			1,58 (1)	1,05 (4)		1,15	28,1
MP21S			1,24 (2)	0,75 (3)		0,95	48,1

Note : le chiffre entre parenthèses indique le nombre de ruptures.

Tableau 5.7 – Résultats des essais d’adhérence selon le type de rupture pour la série 2

Préparation	Cohésive		Adhésive			Moyenne (MPa)	CV (%)
	Réparation (MPa)	Substrat (MPa)	Interface (MPa)	Mixte 1 (MPa)	Mixte 2 (MPa)		
NAT			2,53 (5)			2,53	14,0
SAB			2,09 (5)			2,09	15,2
SCA			1,78 (6)			1,78	18,8
HYD			1,44 (6)			1,44	36,7
MP7S			0,55 (2)	0,91 (4)		0,79	39,3

Note : le chiffre entre parenthèses indique le nombre de rupture.

Les essais caractérisés par une rupture cohésive dans la réparation ne sont pas pris en compte pour l’évaluation de l’adhérence moyenne. En effet, ce type de rupture correspond à une évaluation de la résistance du béton de réparation plutôt qu’à celle de l’adhérence de la réparation. Quoi qu’il en soit, lorsque la rupture survient dans le matériau de réparation ou dans le substrat, on obtient au moins une borne inférieure de la valeur de la résistance de l’interface.

5.4 Analyse des résultats

Les résultats présentés dans la section précédente ont été analysés afin d’évaluer à quel point l’endommagement et la rugosité de surface du substrat influencent la qualité de l’adhérence de la réparation. Par le fait même, l’existence d’une relation entre la rugosité d’une surface préparée et l’adhérence de la réparation a été vérifiée.

5.4.1 Endommagement du substrat et adhérence de la réparation

Les résultats des essais d’adhérence pour les deux séries d’essais sont résumés graphiquement à la figure 5.9. Dans un premier temps, les résultats montrent que la surface MP14 est la seule qui ne respecte pas les recommandations de la procédure CAN/CSA A23.2-6B [2001], soit une adhérence minimale de 0,9 MPa.

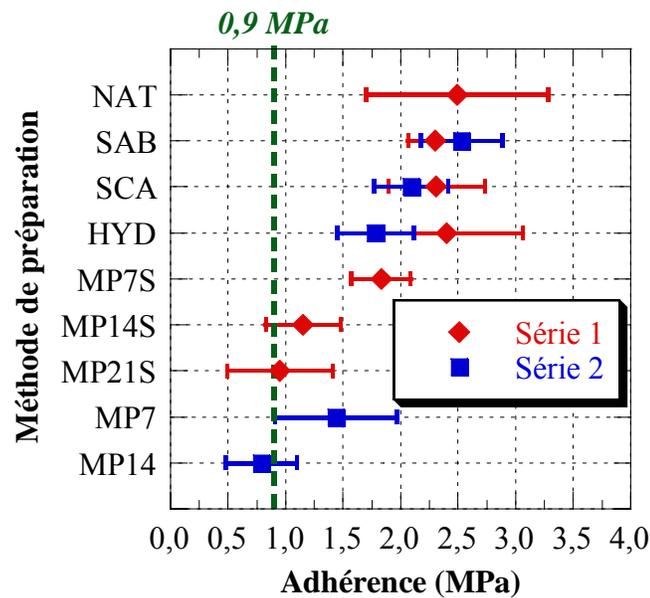


Figure 5.9 – Résultats des essais d’adhérence des deux séries d’essais pour les diverses préparations de surface

Dans un second temps, une diminution significative de l’adhérence est observable pour les surfaces préparées avec les marteaux pneumatiques (MP) lors des deux séries d’essais. Cette réduction de l’adhérence est fortement attribuable à l’endommagement du substrat, comme il est possible de le constater à la figure 5.10. En effet, elle est proportionnelle à l’augmentation du poids du marteau pneumatique. Cette observation concorde d’ailleurs très bien avec les ruptures observées pour les surfaces MP, qui sont principalement des ruptures adhésives mixtes 1, rupture caractéristique des substrats endommagés.

Dans le cas des surfaces NAT, SAB, SCA et HYD, les observations au microscope binoculaire, réalisées pour les surfaces préparées de la série 1, ont démontré un faible endommagement de la surface (voir section 3.3.1). Afin d’analyser davantage les résultats des essais d’adhérence pour les surfaces NAT, SAB, SCA et HYD, l’effet de la rugosité de surface sur l’adhérence des réparations a été étudié.

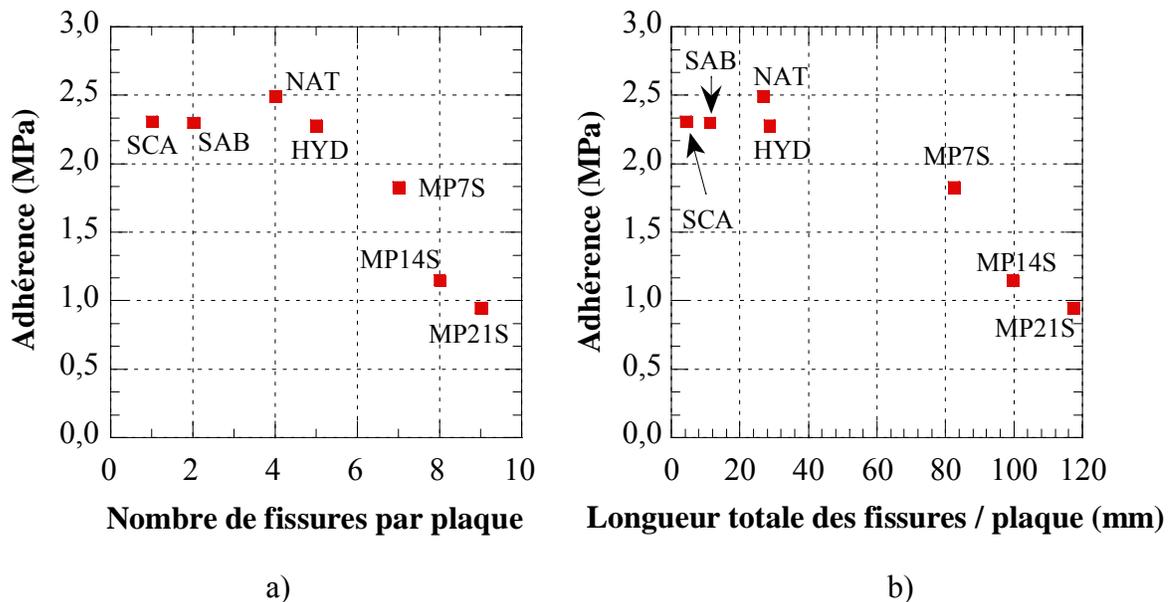


Figure 5.10 – Influence de l'endommagement du substrat sur l'adhérence de la réparation pour les surfaces préparées de la série 1

5.4.2 Rugosité de surface et adhérence de la réparation

À partir des paramètres de rugosité R_a et S_m présentés dans le tableau 5.5, une représentation 2D des profils moyens des surfaces préparées a été réalisée. De plus, l'ouverture moyenne du profil a été quantifiée à partir du paramètre α_{rugo} , qui représente l'angle calculé selon l'équation suivante :

$$\alpha_{\text{rugo}} = a \tan(4R_a/S_m) \quad (12)$$

Une faible ouverture du profil sera caractérisée par un α_{rugo} élevé. La figure 5.11 permet de visualiser les différences de rugosité, le profil moyen et l'angle d'ouverture du profil propres à chacune des surfaces préparées de la série 2. Les points sur la figure indiquent la rugosité de chacun des profils en fonction des paramètres R_a et I_{ss} .

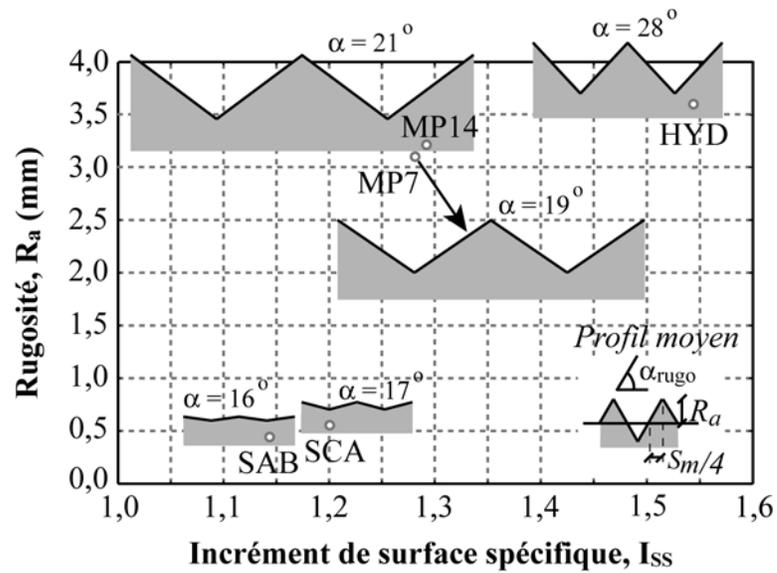


Figure 5.11 – Représentation schématique obtenue des surfaces par les méthodes de préparation de la série 2 [adapté de Perez, 2005]

La figure 5.11 permet de constater que les profils obtenus avec les marteaux pneumatiques sont pratiquement identiques malgré la différence de poids entre les deux appareils. De plus, les surfaces sablées et scarifiées présentent des profils semblables et beaucoup moins rugueux que ceux des marteaux pneumatiques ou de l'hydrodémolition. Pour sa part, la surface hydrodémolie se distingue des surfaces MP7 et MP14 surtout par un $S_m/4$ plus petit, entraînant une ouverture moyenne du profil plus faible.

Les figures 5.12 et 5.13 présentent graphiquement les résultats d'adhérence en fonction de la rugosité de surface exprimée à partir des paramètres R_a et $S_m/4$ pour les deux séries d'essais. Globalement, les deux séries d'essais semblent indiquer que la rugosité de surface, caractérisée à l'échelle étudiée, n'est pas un facteur véritablement significatif. En effet, pour les essais de la série 1, des adhérences similaires ont été obtenues pour les quatre préparations de surface, alors que la surface HYD présentait une rugosité plus élevée que les surfaces NAT, SAB et SCA. Pour les essais de la série 2, malgré le fait que la surface HYD a procuré une adhérence plus faible que les surfaces SAB et SCA, ces deux surfaces ont présenté des adhérences différentes alors que leur rugosité était pratiquement la même.

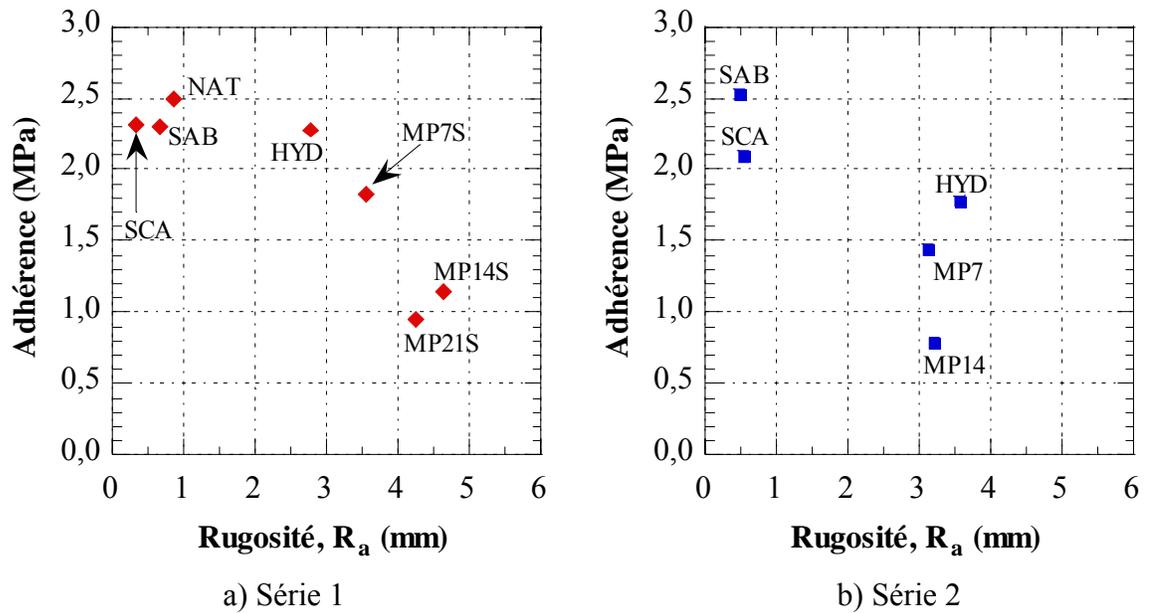


Figure 5.12 – Adhérence selon le paramètre de rugosité R_a

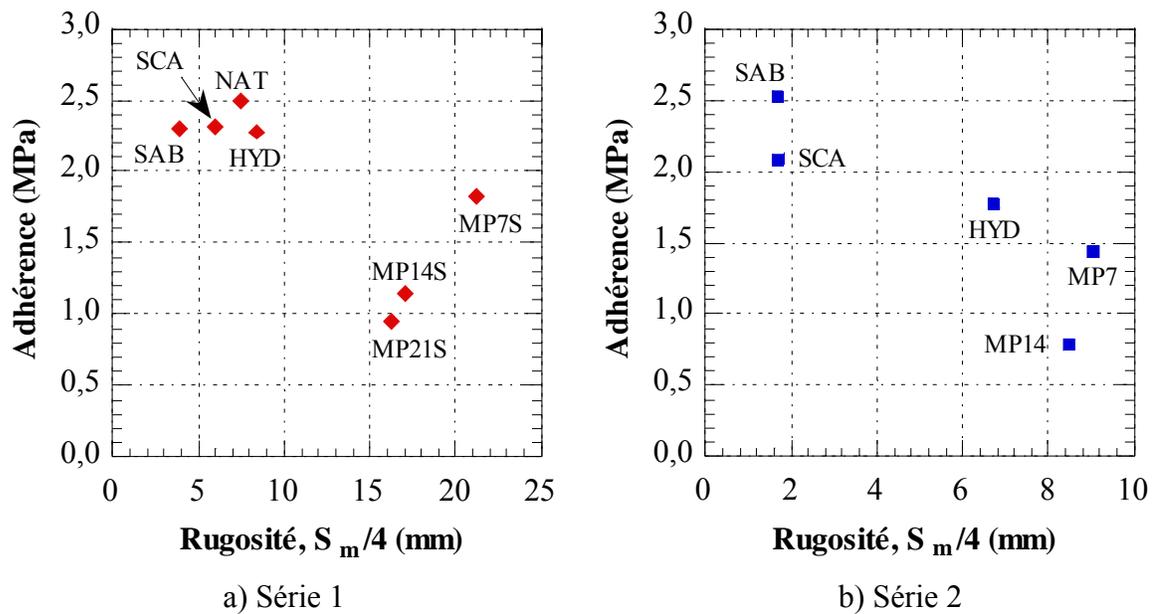


Figure 5.13 – Adhérence selon le paramètre de rugosité $S_m/4$

À première vue, il semble surprenant de constater qu'une rugosité plus élevée ne permet pas une meilleure adhérence. En effet, la surface de contact étant augmentée, davantage de liens peuvent être formés, favorisant l'augmentation de l'adhérence. Toutefois, comme le

montre la figure 5.11, l'augmentation de la rugosité s'accompagne généralement d'une plus faible ouverture du profil, puisque l'angle α_{rugo} s'accroît. Il est donc plus difficile de remplir les creux, favorisant la présence de défauts de remplissage. Les résultats de Courard [1999] indiquent également que l'augmentation de la rugosité favorise l'emprisonnement de bulles d'air dans les creux. La surface de contact resterait donc sensiblement la même peu importe la rugosité de surface puisque la taille et le nombre de défauts de remplissage sont proportionnels à l'angle α_{rugo} , limitant ainsi l'adhérence des réparations. À preuve, parmi les cinq essais d'adhérence réalisés sur la surface HYD de la série 1, la plus faible adhérence a été obtenue pour un essai où des vides ont été observés en périphérie de l'interface.

Dans le domaine des colles polymères, des défauts de remplissage ont également été observés avec l'augmentation de la rugosité, entraînant une diminution de l'adhérence [Couvrat, 1992]. Comme le mentionne Couvrat [1992], la rugosité est un facteur favorable tant que la mouillabilité des creux est assurée, soit lorsqu'un contact intime entre les deux surfaces à assembler est formé.

La rugosité de surface n'étant vraisemblablement pas responsable de la diminution de l'adhérence pour les surfaces SCA et HYD, comparativement à la surface SAB lors de la série 2, il est donc possible que d'autres facteurs, ou un seul, aient influencé l'adhérence des réparations. Dans un premier temps, de l'eau est peut-être demeurée emprisonnée dans les creux des surfaces préparées autres que la surface SAB, celle-ci présentant la plus faible rugosité. Si tel était le cas, le rapport E/C était alors plus élevé à l'interface, entraînant une diminution de la résistance du béton et, par le fait même, une réduction de l'adhérence de la réparation. Toutefois, aucune information n'est disponible afin de confirmer cette hypothèse et il ne s'avère pas évident de relier aussi simplement porosité et adhérence.

Dans un second temps, après avoir consulté les notes prises lors des essais d'adhérence de la série 2 (voir Annexe E), il est possible d'observer que les carottages ont rarement été effectués jusqu'à une profondeur minimale de 30 mm dans le substrat pour les surfaces

HYD, MP7 et MP14. Il en a été ainsi puisque, comparativement aux surfaces SAB et SCA, la rugosité des surfaces HYD, MP7 et MP14 est élevée et il était impossible de savoir exactement à quelle profondeur le carottage devait être réalisé afin d'atteindre une profondeur de 30 mm dans le substrat. Or, comme il a été mentionné à la section 2.5, une plus faible profondeur de carottage se traduit par des concentrations de contraintes plus importantes à l'interface, diminuant ainsi la résistance évaluée. La réduction de l'adhérence observée pour la surface HYD peut donc avoir été engendrée par une profondeur de carottage inadéquate.

En considérant l'hypothèse d'un surplus d'eau à l'interface et les profondeurs de carottage inférieures à celles désirées pour certaines surfaces, dont la surface HYD de la série 2, il apparaît que les résultats de la série 1 indiquent davantage l'effet réel de la rugosité de surface. La conclusion générale des essais d'adhérence est donc qu'il n'existe pas de corrélation claire entre la rugosité de surface et l'adhérence de la réparation. En effet, de bonnes adhérences sont obtenues autant sur des surfaces caractérisées par une faible rugosité (SAB et SCA) que sur des surfaces très rugueuses (HYD). Globalement, les résultats tendent à démontrer que le niveau d'endommagement du substrat est le paramètre principal à prendre en compte afin d'obtenir une bonne adhérence.

5.5 Conclusion

En somme, les résultats expérimentaux tendent à montrer que le facteur qui affecte de manière significative l'adhérence des réparations est l'endommagement du substrat. À preuve, la surface MP21S a démontré l'endommagement le plus élevé et l'adhérence obtenue n'a excédé que de 0,05 MPa l'adhérence minimale recommandée dans la méthode d'essai CAN/CSA 23.2-6B [2001], soit 0,9 MPa. Puisque les essais expérimentaux du Chapitre 3 ont démontré que la cohésion du substrat est également influencée de manière significative par son niveau d'endommagement, la cohésion du substrat est donc un facteur primordial à considérer pour l'obtention d'une bonne adhérence de la réparation. Cela suggère un critère d'acceptation suivant lequel la cohésion des surfaces préparées devrait

représenter une fraction minimale (ex. 80 %) de la cohésion de la surface intacte (mesurée dans les zones exemptes de détérioration).

Par ailleurs, à l'échelle étudiée, les résultats expérimentaux indiquent que l'augmentation de la rugosité n'influence pas de manière significative l'adhérence de la réparation. En effet, des adhérences semblables sont obtenues sur des surfaces peu rugueuses (SAB et SCA) et très rugueuses (HYD). Il n'existe donc pas de corrélation directe entre la rugosité des surfaces préparées et l'adhérence des réparations, du moins pour les paramètres R_a et $S_m/4$.

Les résultats expérimentaux montrent également que l'hydrodémolition est la préparation de surface qui semble être la mieux adaptée. En effet, elle permet d'enlever rapidement le béton endommagé, procurant ainsi une surface permettant une bonne adhérence de la réparation. La surface préparée au jet de sable a procuré une bonne adhérence de la réparation, mais cette préparation présente le désavantage de générer une grande quantité de poussière. La surface préparée par scarification a également permis une bonne adhérence. Toutefois, la surface obtenue lors des présents travaux n'est pas tellement représentative de ce qui est effectué sur chantier, puisque les appareils utilisés pour réaliser ce type de préparation entraînent une texture plus importante, avec des rainures plus profondes dans le béton que la machine employée dans le présent projet. Les résultats de cette étude se limitent donc à la surface étudiée et ne permettent pas de mentionner que la scarification est une méthode à préconiser peu importe l'appareil adopté.

Chapitre 6 Modélisation d'un système de réparation

6.1 Introduction

La revue de documentation a révélé l'intérêt porté par certaines études aux éléments finis afin d'évaluer l'effet de paramètres sur l'adhérence des réparations. Toutefois, aucune étude n'a traité de l'influence de la rugosité de surface. Cette seconde partie du troisième volet expérimental a pour but de vérifier de quelle manière la rugosité de surface affecte les contraintes présentes à l'interface du système de réparation à partir d'une modélisation de l'essai d'adhérence. L'influence des propriétés mécaniques du béton de réparation et de l'adhésif époxy, lorsqu'il est employé pour combler les irrégularités du profil, a également été évaluée.

6.2 Méthodologie

La modélisation de l'essai d'adhérence a été réalisée pour une analyse dans le domaine élastique à partir du logiciel CONVILAG[®]. Cette modélisation a été effectuée en se basant sur une représentation simplifiée du profil des surfaces préparées à l'étude. Les paragraphes qui suivent présentent la méthodologie suivie afin de déterminer les divers paramètres qui entourent la modélisation de l'essai d'adhérence ainsi que les propriétés mécaniques des matériaux utilisés lors des essais en laboratoire.

6.2.1 Paramètres de modélisation

La géométrie adoptée s'apparente à celle présentée sur la figure 5.6. Il s'agit d'une représentation 2D d'une coupe longitudinale d'un carottage caractérisée par une partie supérieure (la réparation) et une partie inférieure (le substrat). L'épaisseur minimale du béton de réparation est de 50 mm plutôt que 75 mm, soit la distance entre les pics du profil et la face supérieure sur laquelle la contrainte est appliquée. Ce choix a été fait puisqu'il est plus facile de visualiser la distribution des contraintes. Pour l'adhésif époxy, une épaisseur de seulement 3 mm au dessus des pics a été représentée puisqu'une fois les irrégularités de la surface remplies, une faible épaisseur est mise en place afin de coller la pastille d'acier.

Les conditions aux limites ont été choisies de sorte qu'il puisse être possible de vérifier ce qui se passe à l'interface réparation/substrat. Ainsi, plutôt que de considérer tout le système défini par l'essai d'adhérence (voir figure 5.6), seuls les matériaux délimités par le carottage ont été considérés. La géométrie obtenue a été représentée à partir d'un maillage composé de 1000 éléments, les premières analyses ayant démontré que les contraintes varient peu au-delà de ce nombre d'éléments. Des éléments plans du deuxième degré, quadrilatéraux et caractérisés par 8 nœuds et 4 points d'intégration ont été utilisés. De plus, des éléments fixes ont été définis dans la partie inférieure de la géométrie et une contrainte de traction de 2,50 MPa a été imposée aux éléments qui délimitent la partie supérieure. La figure 6.1 permet de voir le maillage créé par l'environnement CONVILAG[®], les conditions aux limites ainsi que la géométrie considérée.

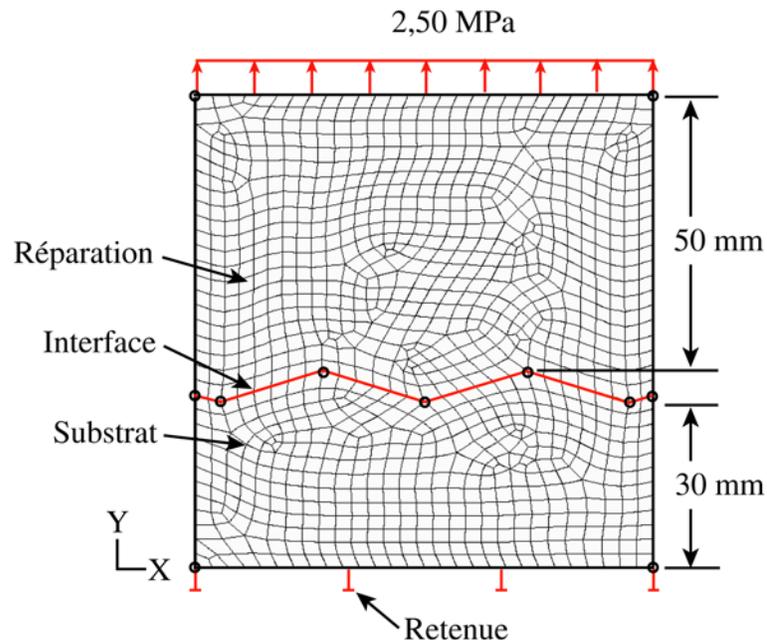


Figure 6.1 – Maillage, géométrie et conditions aux limites

6.2.2 Propriétés mécaniques des matériaux

Les propriétés mécaniques qui doivent être connues afin de réaliser les calculs par éléments finis sont le module d'élasticité (E) et le coefficient de Poisson (ν). Malgré le fait que le béton soit un matériau hétérogène, le module d'élasticité en traction a été considéré le même que celui évalué en compression. Il en est de même pour l'adhésif époxy.

Pour les coefficients de Poisson, puisque aucun essai mécanique n'a été réalisé afin de les évaluer, les hypothèses suivantes ont été considérées. Dans le cas de l'adhésif époxy, puisque le coefficient de Poisson n'est pas connu du fournisseur, une valeur de 0,30 a été prise en compte, valeur utilisée par Biehl [2000] pour l'étude des contraintes de cisaillement dans une couche d'époxy. Pour les bétons du substrat et de la réparation, le coefficient de Poisson a été évalué à partir d'une formule empirique. Une étude réalisée par Klink [1986] propose la formule empirique suivante :

$$\nu_c = (2,0 \times 10^{-9}) w^{1,75} \sqrt{f'_c} \quad (13)$$

où :

ν_c = coefficient de Poisson;

w = masse volumique du béton séché à l'air, kg/m^3 ;

f'_c = résistance en compression, kPa.

Afin de vérifier si l'équation 13 est valable pour des bétons utilisés lors du présent projet, la formule empirique proposée par Klink [1986] pour approximer le module d'élasticité (E_c), présentée ci-dessous, a d'abord été vérifiée.

$$E_c = 0,30 w^{1,75} \sqrt{f'_c} \quad (14)$$

Les modules d'élasticité obtenus avec la formule empirique ont été comparés aux modules d'élasticité évalués expérimentalement à 28 jours pour quatre bétons utilisés lors du présent projet (B1, B2, B3 et B4). Comme il est possible de le constater dans le tableau 6.1, les modules d'élasticité obtenus avec la formule empirique de Klink sont beaucoup plus élevés comparativement aux modules mesurés expérimentalement (E_c mesuré).

Tableau 6.1 – Propriétés de quatre bétons utilisés lors des expérimentations

Béton	E/C	ρ (kg/m ³)	f_c (MPa)	E_c mesuré (MPa)	E_c (Klink) (MPa)
B1	0,40	2265	41,1	30001	45240
B2	0,40	2265	45,3	27697	47478
B3	0,40	2256	44,9	33914	46966
B4	0,40	2259	31,9	29809	39663

La formule empirique présentée à l'équation 14 a donc été modifiée en déterminant une nouvelle valeur de l'exposant caractérisant la masse volumique du béton. La valeur moyenne de l'exposant serait plutôt de 1,699 comparativement à 1,750 dans l'équation initiale. La formule empirique utilisée afin d'évaluer le coefficient de Poisson pour les bétons du présent projet est donc la suivante :

$$\nu_c = (2,0 \times 10^{-9}) w^{1,699} \sqrt{f'_c} \quad (15)$$

Le tableau 6.2 présente les valeurs du coefficient de Poisson évaluées à partir de l'équation 15 ainsi que les valeurs des masses volumiques et des modules d'élasticité. Les propriétés mécaniques moyennes des deux bétons de réparation de la première série d'essais, évaluées à 28 jours, ont été utilisées dans les calculs pour le matériau de réparation. Pour le substrat, les valeurs moyennes des essais de compression évaluées à 28 jours et celles du module d'élasticité obtenues sur des 12 cylindres prélevés à un peu plus de 43 mois ont été prises en compte. Les propriétés de l'adhésif époxy ont été obtenues à partir de la fiche signalétique du fabricant.

Connaissant les propriétés des matériaux utilisés lors des essais en laboratoire, des analyses ont été effectuées afin de vérifier si la rugosité de surface du substrat dans un système de réparation influence de manière significative la répartition et l'intensité des contraintes à l'interface. Pour ce faire, les profils de surface des préparations HYD et SAB ont été utilisés. Ces profils ont été représentés en considérant les paramètres R_a et S_m .

Tableau 6.2 – Propriétés des bétons et de l'adhésif époxy composant les systèmes de réparation lors des essais en laboratoire

Matériau	Masse volumique (kg/m ³)	Résistance en compression (MPa)	Module d'élasticité (MPa)	Coefficient de Poisson
Réparation	2265	43,2	29082	0,209
Substrat	2251	46,1	32844	0,214
Adhésif époxy	1906	81,0	5130	0,300

Par la suite, des analyses ont été réalisées afin de vérifier à quel point les différences entre les propriétés mécaniques des matériaux composant le système de réparation influencent les contraintes présentes à l'interface.

6.3 Présentation des résultats

Les résultats des calculs par éléments finis ont pour but d'évaluer si la rugosité de surface et les propriétés mécaniques du matériau de réparation et du substrat peuvent influencer la distribution des contraintes à l'interface dans un système de réparation.

6.3.1 Influence du profil de surface

Les analyses ont principalement porté sur la comparaison des contraintes présentes à l'interface entre les préparations SAB, HYD et MP21S. Ces profils ont été retenus puisqu'ils sont caractérisés par des paramètres d'état de surface bien différents, comme il est possible de le voir dans le tableau 6.3. Les paramètres de rugosité utilisés afin de pouvoir représenter les profils de surface ont été obtenus avec le champ court.

Tableau 6.3 – Caractéristiques des préparations de surface (champ court)

Préparation	Ra (mm)	Sm (mm)
SAB	0,67	15,8
HYD	2,78	33,6
MP21S	4,23	65,2

Un profil plat a également été représenté afin de voir la distribution des contraintes en l'absence de rugosité. Les figures 6.2 à 6.5 présentent les résultats des calculs par éléments finis des contraintes dans le système de réparation selon le profil de surface considéré. L'interface délimitant la réparation et le substrat est représentée par la ligne pointillée noire.

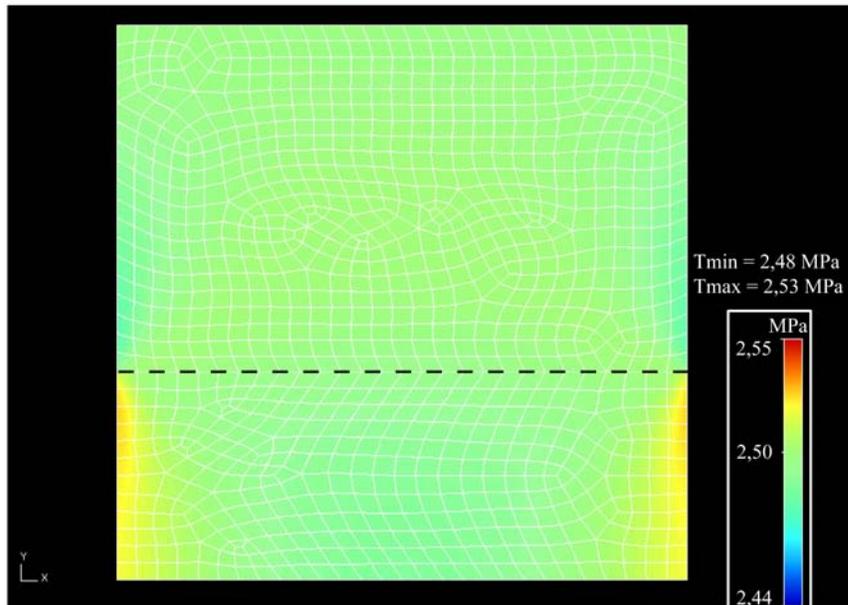


Figure 6.2 – Distribution des contraintes dans le système de réparation pour le profil plat

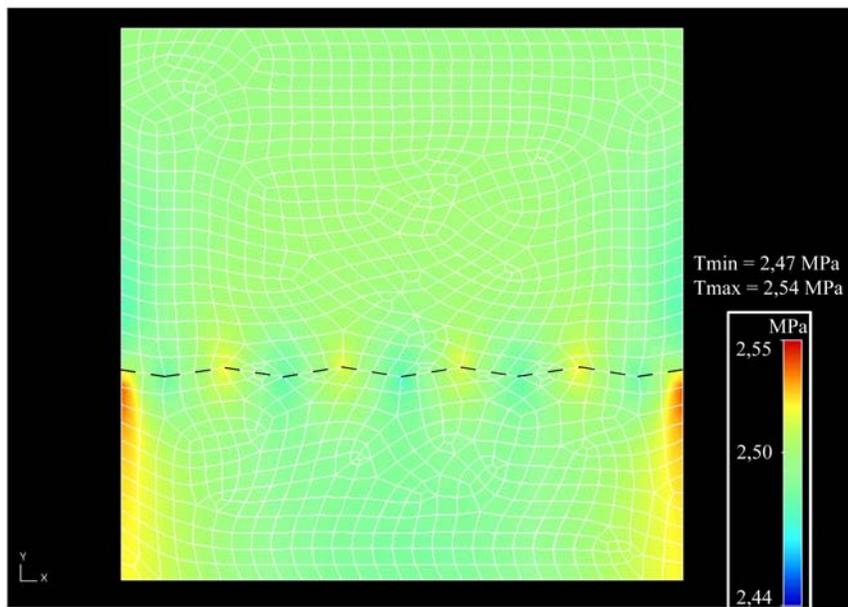


Figure 6.3 – Distribution des contraintes dans le système de réparation pour le profil SAB

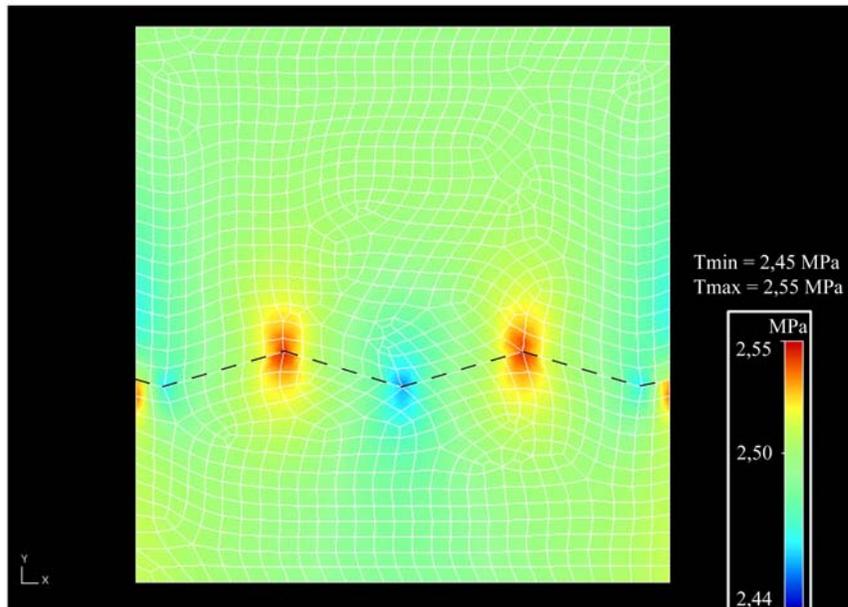


Figure 6.4 – Distribution des contraintes dans le système de réparation pour le profil HYD

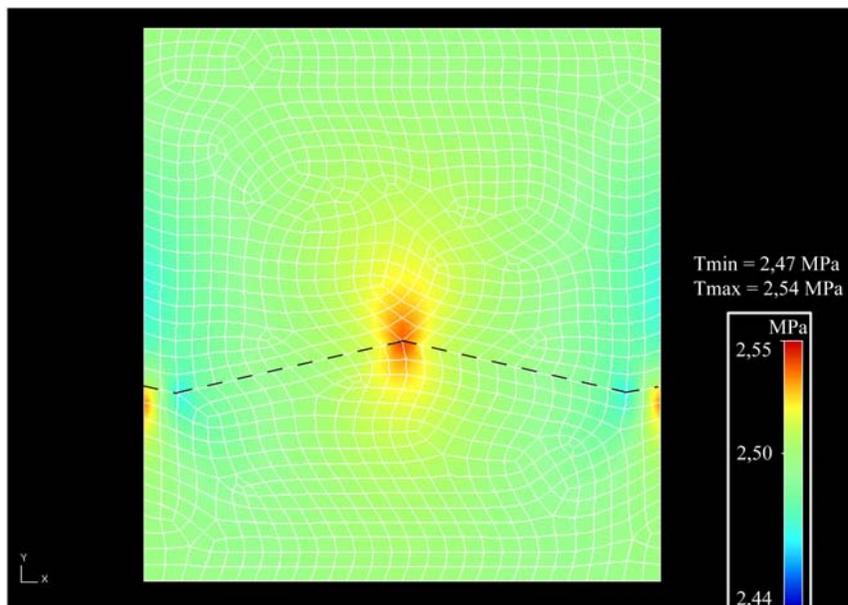


Figure 6.5 – Distribution des contraintes dans le système de réparation pour le profil MP21S

6.3.2 Influence des propriétés mécaniques

Afin d'observer l'influence des propriétés mécaniques des matériaux de réparation sur les contraintes présentes dans un système de réparation, une analyse supplémentaire a été réalisée. Il s'agit d'une analyse qui se compare à celle présente à la figure 6.4, excepté que le matériau de réparation est caractérisé par les propriétés mécaniques de l'adhésif époxy. De plus, puisqu'une fine couche d'adhésif époxy est généralement mise en place au dessus des pics de la surface à évaluer, alors une épaisseur de 3 mm seulement a été simulée à ces endroits. Le calcul par éléments finis produit selon ces conditions est présenté à la figure 6.6.

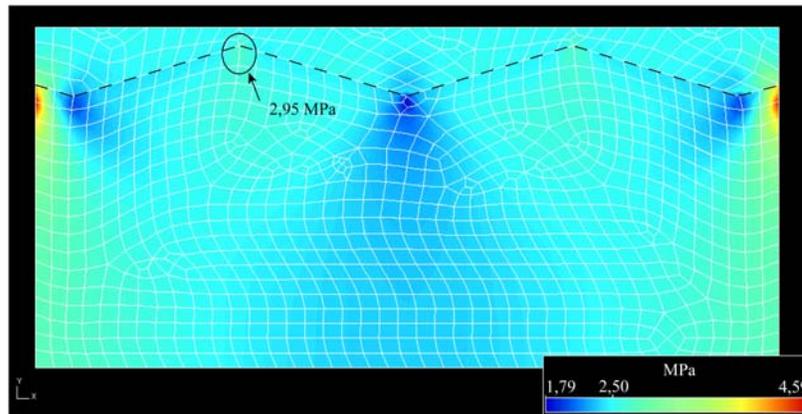


Figure 6.6 – Distribution des contraintes avec l'adhésif époxy sur le substrat en béton caractérisé par le profil HYD

6.4 Analyse des résultats

Selon les résultats présentés dans la section 5.4.1, la rugosité des surfaces ne semble pas influencer de façon significative l'adhérence des réparations en béton à l'échelle étudiée. Les calculs par éléments finis, réalisés dans les conditions présentées dans la section 6.2.1, tendent à confirmer ces observations. En effet, ils démontrent que les contraintes à l'interface sont peu influencées par l'augmentation de la rugosité de surface du substrat, comme le montre le tableau 6.4.

Tableau 6.4 – Contraintes présentes à l'interface selon le profil considéré

		Profil plat	Profil SAB	Profil HYD	Profil MP21S
Tmin	(MPa)	2,48	2,47	2,45	2,47
Tmax	(MPa)	2,53	2,54	2,55	2,54
Différence	(MPa)	0,05	0,07	0,11	0,09

Comme il est possible de l'observer sur les figures 6.2 à 6.6, les concentrations de contraintes sont situées à l'emplacement des pics et des creux de l'interface. Dans les cas étudiés, étant donné que le substrat est plus rigide que le matériau de réparation, les contraintes maximales sont situées aux pics. Il en est ainsi puisque pour assurer la compatibilité des déformations, le substrat doit se déformer de la même manière que la réparation. Le respect de cette compatibilité entraîne donc une augmentation des contraintes dans le substrat à l'emplacement des pics. Évidemment, une seule forme du profil a été étudiée dans le cadre de ce projet. Il est possible qu'une configuration plus complexe du profil des surfaces entraîne des résultats différents et plus significatifs.

L'augmentation de la rugosité de surface du substrat pour les cas étudiés entraîne peu de variation des contraintes à l'interface, mais elle permet la présence d'un plus grand nombre de concentrations de contraintes. Cet aspect pourrait devenir problématique dans la mesure où les deux matériaux qui composent le système de réparation présentent des propriétés mécaniques très différentes. Le cas étudié à la figure 6.6 confirme d'ailleurs cette hypothèse. Toutefois, la zone qui semble être la plus influencée à l'interface se situe à sa périphérie. En effet, avec l'adhésif époxy comme matériau de réparation, la contrainte maximale aux pics est augmentée de 15,7% par rapport à celle observée avec le béton de réparation, mais celle qui est présente aux extrémités de l'interface est 80,7% plus élevée. Elle représente donc 1,84 fois la contrainte appliquée initialement. Il y a donc une concentration de contraintes très forte lorsque les propriétés des matériaux diffèrent fortement à cet emplacement. Dans ce cas, une question se pose. Pour quelle raison les plans de rupture avec les surfaces NAT, SAB, SCA et HYD ne sont pas situés près de la surface? Et bien, comme l'indiquent les travaux de Vaysburd et McDonald [1999], les

concentrations de contraintes maximales présentes au fond du carottage sont 2,2 fois plus élevées en périphérie que les valeurs obtenues lors de la rupture des spécimens. Cette forte concentration de contraintes favorise donc la rupture au fond du carottage plutôt qu'en surface.

6.5 Conclusion

Les calculs par éléments finis, réalisés dans les conditions mentionnées à la section 6.2.1, ont montré que la rugosité de surface du substrat n'influence pas de manière significative les contraintes présentes à l'interface. La rugosité de surface ne semble donc pas représenter un facteur pouvant nuire à une bonne adhérence entre le béton de réparation et le substrat. Les calculs par éléments finis ont également permis d'observer que les propriétés mécaniques des matériaux constituant le système de réparation affectent les contraintes présentes en périphérie de l'interface. Cependant, en tenant compte des conditions réelles de l'essai, tel que Vaysburd et McDonald [1999] l'ont simulé, les contraintes au fond du carottage sont plus importantes. Les propriétés mécaniques des matériaux de réparation utilisés dans le cadre de ce projet ne semblent donc pas avoir eu d'incidence sur les adhérences évaluées.

Chapitre 7 Conclusions et recommandations

7.1 Objectifs poursuivis

Le présent travail avait pour principal objectif de développer et de valider une méthode de caractérisation quantitative des préparations de surfaces en vue de travaux de réfection. À cet objectif principal s'est ajouté l'étude de l'influence du type de préparation de surface sur l'intégrité des surfaces préparées, ainsi que la vérification de l'existence d'une corrélation entre la rugosité de surface et l'adhérence des réparations.

7.2 Résultats principaux et conclusions

Les paragraphes qui suivent présentent les principaux résultats des trois volets expérimentaux du projet ainsi que les conclusions tirées des analyses de ces résultats.

7.2.1 Intégrité des surfaces préparées

Les essais de cohésion en traction ont montré que les techniques d'abrasion (hydrodémolition, sablage) et de broyage (scarification) influencent peu la résistance de la surface une fois celle-ci préparée comparativement aux techniques par percussion. Ces résultats s'expliquent par le niveau d'endommagement des surfaces. En effet, les observations au microscope binoculaire ont permis de constater que les surfaces sablées, scarifiées et hydrodémolies présentent peu d'endommagement comparativement aux surfaces préparées avec les marteaux pneumatiques. Les essais d'absorption capillaire vont dans le même sens, des sauts dans les lectures des surfaces préparées avec les marteaux pneumatiques dénotant la présence de fissures.

7.2.2 Méthode de caractérisation quantitative

Les essais réalisés lors du second volet expérimental ont conduit au développement de l'essai accéléré de cohésion. Les essais sur les dalles de béton coulé ont démontré que cet essai est en mesure de distinguer deux bétons de résistances différentes, les forces d'arrachement étant proportionnelles aux résistances en traction et en compression du

béton. De plus, les essais réalisés sur les diverses surfaces préparées ont indiqué des résistances plus faibles pour les surfaces préparées avec les marteaux pneumatiques comparativement aux surfaces sablée et naturelle. Cependant, une faible influence du poids du marteau pneumatique a été observée, résultat qui pourrait être attribuable au choix subjectif de l'emplacement des essais.

Deux autres méthodes de caractérisation quantitative in situ des surfaces préparées ont également été mises à l'épreuve, soit l'essai de cohésion en traction et l'essai au marteau Schmidt. La méthode qui a permis d'obtenir les résultats les plus significatifs est l'essai de cohésion en traction. En effet, cette méthode a démontré un très bon potentiel à distinguer deux bétons dont la résistance en traction diffère puisque les valeurs se comparent à celles de l'essai de traction par fendage. Les valeurs sont également peu variables, ce qui démontre une bonne reproductibilité de l'essai. De plus, une diminution significative de la résistance en traction de la surface a été observée en augmentant le poids du marteau pneumatique. Dans le cas de l'essai au marteau Schmidt, les résultats sont, de prime abord, peu concluants (faible sensibilité à la résistance en compression des deux bétons utilisés et faible influence de l'augmentation du poids du marteau pneumatique). Toutefois, si l'emplacement des essais avait été établi de façon plus objective et les résultats analysés en regard de la valeur obtenue sur une surface intacte du même béton, il aurait été vraisemblablement possible d'obtenir de l'information utile. Les résultats obtenus tendent en effet à démontrer que la réponse augmente en variabilité avec l'accroissement de l'endommagement du substrat.

Lors de l'évaluation des méthodes de caractérisation quantitative de surfaces préparées, une méthode d'analyse a également été proposée afin d'établir si une surface préparée est apte à recevoir une réparation. Cette méthode d'analyse, applicable pour les différents essais évalués, consiste à vérifier si les résultats obtenus respectent une certaine probabilité d'occurrence pour une valeur critique établie à partir des paramètres μ et σ . Il est à noter que ces deux paramètres doivent être déterminés sur une partie saine du même béton à

évaluer. Le critère d'acceptation proposé est obtenu avec une équation ayant la forme suivante :

$$P(X \leq \mu - M\sigma) < Y \quad (16)$$

où :

→ valeur critique

X = résistance évaluée sur une surface préparée;

μ = résistance moyenne des essais sur une surface saine;

M = facteur d'amplification;

σ = écart-type des essais sur une surface saine;

Y = probabilité d'occurrence critique (%).

7.2.3 Adhérence des réparations sur surfaces préparées

Les essais d'adhérence ont démontré que l'endommagement du substrat influence de manière significative l'adhérence des réparations, les meilleures adhérences ayant été obtenues pour les surfaces NAT, SAB, SCA et HYD. L'utilisation des marteaux pneumatiques devrait donc être limitée à l'enlèvement grossier du béton endommagé. De plus, l'évaluation de la rugosité des supports préparés a permis d'observer qu'il n'existe aucune corrélation entre la rugosité de surface et l'adhérence des réparations. En effet, de bonnes adhérences ont été obtenues tant sur des surfaces peu rugueuses (sablées ou scarifiées) que sur des surfaces très rugueuses (hydrodémolies). Il semble donc que l'adhérence des réparations est davantage influencée par l'intégrité du substrat que par la rugosité de sa surface. Les calculs par éléments finis ont également montré que la rugosité de surface influence peu les contraintes présentes à l'interface. De plus, afin de minimiser les contraintes présentes à l'interface, il est préférable que la rigidité des matériaux qui constituent le système de réparation soit similaire.

7.3 Recommandations

Cette section présente des recommandations quant à la méthode de caractérisation quantitative de la surface préparée permettant de bien évaluer l'intégrité de la surface d'un

support en béton après enlèvement du béton détérioré. Des recommandations sont également soumises pour les méthodes de préparation de surface et la rugosité des surfaces préparées.

7.3.1 Méthode de caractérisation quantitative

Parmi les essais de caractérisation quantitative considérés dans ce projet, celui qui semble permettre la meilleure évaluation de l'intégrité des surfaces préparées est l'essai de cohésion en traction. Cependant, l'essai accéléré de cohésion et l'essai au marteau Schmidt présentent des attraits beaucoup plus intéressants, puisqu'il est possible de réaliser plusieurs essais en peu de temps et qu'ils nécessitent peu d'outillage. Toutefois, puisque les essais réalisés dans le cadre de ce travail ont été choisis de manière subjective, hors des zones soumises par la pointe du marteau pneumatique, il n'est pas possible de déterminer la méthode la mieux adaptée. Pour se faire, davantage d'essais en laboratoire doivent être réalisés (voir section 7.4).

7.3.2 Préparation de surface

À partir des résultats obtenus lors de ce projet, la préparation de surface recommandée afin d'enlever le béton détérioré est une préparation avec jet d'eau sous pression (hydrodémolition). En effet, il semble qu'une surface hydrodémolie procure non seulement une bonne adhérence de la réparation, mais assure également une bonne cohésion du support, la surface étant peu endommagée, comparativement aux surfaces préparées avec les marteaux pneumatiques. Une attention particulière doit être portée si des barres d'armature sont à dégager afin de ne pas réduire leur section. Les préparations de surface au jet de sable ou à la scarification ont également procuré une bonne adhérence, et l'endommagement observé semble être légèrement inférieur à celui de la surface naturelle. Ainsi, pour les surfaces verticales et surplombantes, surfaces pour lesquelles l'hydrodémolition est parfois difficilement réalisable, le jet de sable ou la scarification pourrait être utilisé. Toutefois, le jet de sable produit beaucoup de poussière et l'appareil utilisé pour reproduire la scarification sur les supports n'est pas représentatif de ce qui est effectué sur chantier pour des structures imposantes. L'emploi de marteaux pneumatiques

pourrait alors être adopté en prenant soin d'employer un marteau léger pour terminer la préparation et en contrôlant le niveau d'endommagement par des mesures au marteau Schmidt par exemple.

7.3.3 Rugosité de la surface préparée

Les essais d'adhérence ont indiqué qu'il n'existe pas de relation claire ou directe entre la rugosité de surface et l'adhérence de la réparation. La conclusion tirée de ces essais n'est pas nette entre autre parce que l'appareil de numérisation utilisé pour chacune des deux séries d'essais n'était pas caractérisé par la même résolution. De plus, l'appareil de numérisation avec la résolution la plus élevée n'a été utilisé que pour cinq préparations de surface. Seulement deux bétons ordinaires ont également été utilisés pour le matériau de réparation. Pour ces raisons, aucune recommandation précise ne peut être formulée en ce qui concerne les paramètres qui caractérisent la rugosité, soit R_a et $S_m/4$ principalement. Davantage d'essais mériteraient d'être réalisés avec des matériaux de réparation de diverses consistances. En effet, un matériau de consistance élevée, appliqué sur une surface présentant des creux étroits et profonds, est susceptible d'entraîner des défauts de remplissage à l'interface qui pourraient affecter l'adhérence de la réparation.

7.4 Perspectives de recherche

Dans un premier temps, il est nécessaire de réaliser davantage de tests dans le cas de l'essai accéléré de cohésion et sur des surfaces préparées, avec et sans endommagement, afin de valider l'essai. Dans le but d'éviter la subjectivité de l'opérateur, une évaluation systématique des surfaces devrait être réalisée en effectuant, par exemple, un quadrillage de la zone à évaluer. Ainsi, les zones caractérisées par une dépression importante de la surface, causée par la pointe d'un marteau pneumatique par exemple, seraient également évaluées. Des essais au marteau Schmidt devraient également être réalisés selon la même procédure de quadrillage afin de vérifier le potentiel de cette méthode de caractérisation pour l'évaluation de l'intégrité de la surface préparée. Parallèlement, des essais de cohésion en traction devraient être effectués afin de pouvoir comparer les résultats obtenus avec ceux

des essais accélérés de cohésion et au marteau Schmidt. Ces essais devraient permettre de déterminer la méthode de caractérisation la mieux adaptée pour évaluer la résistance des surfaces préparées, soit l'essai accéléré de cohésion ou l'essai au marteau Schmidt. Des observations au microscope binoculaire des surfaces préparées pourraient également être réalisées afin d'évaluer le niveau d'endommagement des surfaces préparées.

Par le fait même, les paramètres qui définissent le critère d'acceptation mentionné auparavant (voir section 7.2.2) pourraient être déterminés pour la méthode de caractérisation adoptée. De plus, une réparation pourrait être appliquée sur les surfaces préparées dans le but de vérifier si l'adhérence moyenne mesurée est proportionnelle à la cohésion moyenne évaluée. Par la suite, des essais in situ (sur chantier) devraient permettre de valider le critère d'acceptation proposé et d'apporter des ajustements à la procédure présentée dans la section 4.4.3.2 si nécessaire.

Dans un second temps, une étude approfondie de l'adhérence des réparations selon la rugosité de surface, sur des surfaces non endommagées, devrait être réalisée. Les surfaces pourraient être créées en coulant un béton sur des surfaces présentant diverses rugosités et préalablement huilées. Une fois démoulée, la partie coulée servirait comme substrat. Des essais d'adhérence avec divers matériaux de réparation pourraient être effectués afin d'évaluer non seulement l'effet de la rugosité de surface, mais aussi celui de la consistance des matériaux de réparation. Des critères d'évaluation de la préparation de surface pourraient alors être émis et permettre au surveillant de chantier d'exiger une meilleure préparation de la surface adaptée au matériau de réparation préconisé. L'appareil de numérisation d'InSpeck et le programme **RugoID**³ représentent donc des outils indispensables à cet effet.

Bibliographie

ABU-TAIR, A.I. et coll. (2000) *A new method for evaluating the surface roughness of concrete cut for repair or strengthening*, Construction and building materials, vol. 14, no 3, pp. 171-176.

ASTM C39 (1999) *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, Annual Book of ASTM Standards, Concrete and aggregates, volume 04.02, pp. 17-21.

ASTM C143 (1999) *Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete*, Annual Book of ASTM Standards, Concrete and aggregates, volume 04.02, pp. 88-89.

ASTM C231 (1999) *Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method*, Annual Book of ASTM Standards, Concrete and aggregates, volume 04.02.

ASTM C469 (1999) *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*, Annual Book of ASTM Standards, Concrete and aggregates, volume 04.02, pp. 241-244.

ASTM C496 (1999) *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, Annual Book of ASTM Standards, Concrete and aggregates, volume 04.02, pp. 17-21.

ASTM C900 (1999) *Standard Test Method for Pull-out Strength of Hardened Concrete*, Annual Book of ASTM Standards, Concrete and aggregates, volume 04.02, pp. 472-476.

ASTM C1583 (2004) *Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-out Method)*, Annual Book of ASTM Standards, Concrete and aggregates, volume 04.02.

AUBOUIN, A. et coll. (2001) *Applications industrielles du moiré d'ombre et de projection à la limite des possibilités de ces techniques*, Colloque Photomécanique, pp. 247-254.

AUSTIN, S. et coll. (1995) *Tensile bond testing of concrete repairs*, Materials and Structures, vol. 28, no 179, pp. 249-259.

BIEHL, F. (2000) *GLAST Epoxy Thermal Shear Stress*, Los Alamos, 11 pages.

BISSONNETTE, Benoit (1996) *Le fluage en traction: un aspect important de la problématique des réparations minces en béton*, Thèse de Doctorat, Université Laval, Québec.

BS 1881 : Part 207 (1992) *Recommandations for the assessment of concrete near-to-surface tests*, British Standards Institution, London.

BUNGEY, J. H. et M.N. Soutsos (2001) *Reliability of partially-destructive tests of assess the strength of concrete on site*, Construction and Building Materials, vol. 15, no 2-3, pp. 81-92.

CANADIAN PORTLAND CEMENT ASSOCIATION [CPCA] (1998) *Concrete Design Handbook*, Second Edition, Canada.

CEN TC104 (1992) *Draft European Standard on Products and Systems for the Protection and Repair of Concrete Structures*, CEN/TC104/WG8/TG2, Draft EN YYY, Part 39.

Centre de Recherches Routières (1969) *Essai à la tache de sable. Détermination de la profondeur moyenne de nivellement des stries des revêtements en béton de ciment*, C.R.R, Bruxelles, MF 32/69.

CLELAND, D.J. et coll. (1986) *Bond strength of patch repair mortars for concrete*, Chapman & Hall, pp. 235-245.

COURARD, L. (1999) *Contribution à l'analyse des paramètres influençant la création de l'interface entre un béton et un système de réparation*, Thèse de Doctorat, Université de Liège, Liège, 198 pages.

COURARD, L. et B. Bissonnette. (2004) *Essai dérivé de l'essai d'adhérence pour la caractérisation de la cohésion superficielle des supports en béton dans les travaux de réparation : analyse des paramètres d'essai*, Materials and Structures/Matériaux et Construction, vol. 37, no 269, pp. 342-350.

COURARD, L. et R. Degeimbre (2003) *A capillary action test for the investigation of adhesion in repair technology*, Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 30, pp. 1101–1110.

COUVRAT, P. (1990) *Le collage moderne*, Éditions Hermes, Paris, 63 pages.

COUVRAT, P. (1992) *Le collage structural moderne : théorie & pratique*, Tec & Doc – Lavoisier, Paris, 246 pages.

- CSA A23.2-6B (2001) *Détermination de l'adhérence sous charge de traction*, CSA International.
- CUSSON, D. et N. Mailvaganam (1996) *Durability of Repair materials*, Concrete International, vol. 18, no 3, pp. 34-38.
- DESROSIERS, H. (1999) *Influence des cendres volantes sur le comportement au gel des matériaux cimentaires*, Thèse de Maîtrise, Université Laval, Québec, 299 pages.
- DRAPEAU, A. et M. Bélanger (1995) *Manuel d'inspection des structures – Évaluation des dommages*, Direction des Structures, Ministère des Transports, Québec, Québec.
- EMBERSON, N.K. and G.C. Mays (1990) *Significance of property mismatch in the patch repair of structure concrete Part I : Properties of repair systems*, Magazine of Concrete Research, 42, no 152, pp. 147-160.
- EMMONS, P.H. et coll. (1994) *Concrete repair in the future turn of the century – Any problems?*, vol. 6, no. 3, pp. 42-49.
- FELT, E.J. (1956) *Resurfacing and Patching Concrete Pavement with Bonded Concrete*, Proceeding of Highway Research Board, pp. 444-469.
- GALECKI, G. et coll. (2001) *Limitations to the use of waterjets in concrete substrate preparation*, WJTA American Waterjet Conference, Minneapolis, Minnesota, page 35.
- GODFREY, M.G. et coll. (1986) *Revision Statistics*, Edward Arnold, London, 144 pages.
- HINDO, K.R. (1990) *In-Place Bond Testing and Surface Preparation of Concrete*, Concrete international, vol. 12, no 4, pp. 46-48.

- KAMADA, T. et Victor C. Li (2000) *The effects of surface preparation on the fracture behaviour of ECC/concrete repair system*, Cement and Concrete Composites, vol. 22, no 6, pp. 423-431.
- KLINK, Sami A. (1986) *Aggregates, Elastic-Modulus and Poisson's Ratio of Concrete*, ACI Journal, vol. 83, no 6, pp. 961-965.
- KÜNTZ, M. et coll. (2003) *Confirmation of anomalous diffusion in non saturated porous building materials by a new capillary absorption test*, American Society for Testing and Materials, 13 pages.
- LANGLOIS, M et coll. (1994) *Durability of Pavement Repairs : A Field Experiment*, Concrete International, vol. 16, no 8, August 1994, pp. 39-43.
- LI, G et coll. (2001) *Transition zone studies of new-to-old concrete with different binders*, Cement & Concrete Composites, vol. 23, pp. 381-387.
- MACHABÉE, Yannick (2001) *Choix des méthodes pour l'évaluation non destructive des ouvrages de béton*, INFRA 2001, Holiday Inn Midtown, Montréal, Québec, 20 pages.
- MAERZ, N.H. et coll. (2001) *Laser profilometry for concrete substrate characterization prior to FRP laminate application*, Concrete repair bulletin, pp. 4-8.
- MONTGOMERY, Douglas C. et G.C. Runger (1999) *Applied Statistics and Probability for Engineers*, John Wiley & Sons, Inc., Second Edition, 817 pages.
- MOREAU, M. et A. Mathieu (1979) *Statistique appliquée à l'expérimentation*, Ed. Eyrolles, Paris, 188 pages.

- MORGAN, D.R. (1996) *Compatibility of concrete repair materials and systems*, Construction and Building Materials, vol. 10, no 1, pp, 57-67.
- NEVILLE, A. M. (2000) *Propriétés des bétons*, Éditions Eyrolles, Paris, 806 pages.
- PEREZ, F. (2005) *Contribution à l'étude du comportement mécanique des éléments bicouches composés de bétons d'âge différents sous sollicitations monotones et cycliques*, Thèse de Doctorat, Université Laval, Québec.
- prEN 1542 (1994) *Products and systems of the protection and repair of concrete structures – Test methods – Pull-off test*, Comité Européen de Normalisation, Bruxelles.
- prEN 1766 (1995) *Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton – Méthodes d'essais – Bétons de référence pour essais*, Comité Européen de Normalisation, Bruxelles.
- SAUCIER, F. (1990) *La durabilité de l'adhérence des réparations en béton*, Thèse de Doctorat, Université Laval, Québec, 145 pages.
- SAUCIER, F. et M. Pigeon. (1996) *Testing of Superficial Repairs for Sidewalks in Canada*, Concrete International, vol. 18, no 5, 84 pages (39-43).
- SILFWERBRAND, J. (1990) *Improving Concrete Bond in Repaired Bridge Decks*, Concrete international, vol. 12, no 9, pp. 61-66.
- SILFWERBRAND, J. et J. Paulsson (1998) *Better Bonding of Bridge Deck Overlays*, Concrete International, vol. 20, no. 10, pp. 56-61.

- SILFWERBRAND, J. (2000) *Evaluation of tests on water-jet equipment*, Royal Institute of Technology, Sweden, pp. 113-119.
- SPIEGEL, Murray R. (1974) *Formules et tables de mathématiques, Série Schaum*, McGraw-Hill, New York, 272 pages.
- TALBOT, C. et coll. (1994) *Influence of Surface Preparation on Long-term Bonding of Shotcrete*, ACI materials journal, vol. 91, no 6, pp. 560-566.
- TASONG, W.A., et coll. (1998) *Aggregate-cement paste interface, II: influence of aggregate physical properties*, Cement and concrete research, vol. 28, no 10, pp. 1453-1465.
- VAN MIER, J.G.M. *Fracture Processes of Concrete*, U.S.A., CRC Press, 1997, 448 pages.
- VAYSBURD, A.M. et J.E. McDonald (1999) *An evaluation of Equipment and Procedures for Tensile Bond Testing of Concrete Repairs*, US Army Corps of Engineering, 65 pages.
- WELLS, J.A. et coll. (1999) *Getting Better Bond in Concrete Overlays*, Concrete international, vol. 21, no 3, pp. 49-52.
- WU, K.-R. et coll. (2000) *Reconstruction and analysis of 3-D profile of fracture surface of concrete*, Cement and Concrete Research, vol. 30, no 6, pp. 981-987.

Annexe A
Caractérisation des bétons à l'état frais et durci

Volet expérimental 1

Tableau A 1 – Propriétés des bétons utilisés pour confectionner les supports afin de réaliser les essais de cohésion en traction et qui ont servi comme substrat lors des essais d'adhérence du volet expérimental 3

No mélange	Béton frais		Béton durci				Méthode de préparation	
	Teneur en air (%)	Affaissement (mm)	F _c (28 jours) (MPa)	F _c [*] (≈ 43 mois) (MPa)	F _{st} (≈ 43 mois) (MPa)	Module d'élasticité (≈ 43 mois) (MPa)	Série 1	Série 2
0151-1	5,9	20	48,8 (3,7)	49,2 (-)	3,58 (6,5)	32743 (5,4)	MP7S	MP14
0151-2	5,8	90	47,2 (1,2)		—	—	MP14	MP7
0151-3	7,5	70	47,0 (1,1)		—	—	MP21	—
0151-4	6,4	70	39,3 (10,3)	44,2 (-)	3,42 (5,7)	33195 (6,2)	SCA	SCA
0151-5	7,1	77	—	49,8 (-)	3,55 (9,4)	32593 (11)	HYD et SAB	HYD et SAB
0151-6	5,8	35	48,3 (2,2)		—	—	NAT et POL	—

Note : le nombre entre parenthèses indique le coefficient de variation en pourcentage.

Volet expérimental 2

Tableau A 2 – Propriétés des bétons pour les dalles de béton coulé

No mélange	Identification	Béton frais		Béton durci (28 jours)			Béton durci (123 jours)	
		Teneur en air (%)	Affaissement (mm)	F _c (MPa)	F _{st} (MPa)	Module d'élasticité (MPa)	F _c (MPa)	F _{st} (MPa)
0151-16	Béton C1	11	145	32,3 (2,8)	3,33 (7,0)	27914 (4,1)	34,1 (7,5)	3,22 (7,8)
0151-17	Béton C2	9	75	46,0 (3,5)	4,03 (8,5)	34062 (14)	44,3 (15)	3,96 (7,0)
0151-18	Béton C3	11	135	41,7 (1,5)	3,83 (26)	31865 (4,7)	43,9 (15)	3,63 (2,4)

Note : le nombre entre parenthèses indique le coefficient de variation en pourcentage.

Tableau A 3 – Propriétés des bétons des supports

No mélange	Identification	Béton frais		Béton durci		
		Teneur en air (%)	Affaissement (mm)	F _c (MPa)	F _{st} (MPa)	Module d'élasticité (MPa)
0151-6	Support 1	5,8	35	48,3 (2,2)	—	—
0151-6	Support 2	5,8	35	48,3 (2,2)	—	—
0151-5	Support 3	7,1	77	—	3,55 (9,4)	32593 (11)

Note : le nombre entre parenthèse indique le coefficient de variation en pourcentage.

Volet expérimental 3

Tableau A 4 – Propriétés des bétons de réparation

	No mélange	Béton frais		Béton durci		
		Teneur en air (%)	Affaissement (mm)	F _c (MPa)	F _{st} (MPa)	Module d'élasticité (MPa)
Série 1	0151-9	5,0	30	41,1 (18)	3,65 (17)	30467 (11)
	0151-10	5,4	30	45,3 (3,5)	3,55 (11)	27697 (5,3)
Série 2	0151-15	9,9	125	41,6 (3,7)	3,38 (12)	30967 (5,4)

Note : le nombre entre parenthèses indique le coefficient de variation en pourcentage.

Annexe B
Résultats des essais de cohésion en traction
Chapitre 3

Essais de la série 1

Tableau B 1 – Résultats des essais de cohésion en traction sur support NAT

Éprouvette	Prof. Min. (mm)	Prof. Max. (mm)	Charge de rupture (kN)	Cohésion (MPa)	Type de rupture
1	29	31	13,5	3,06	Fond
2	29	30	14,0	3,17	Fond
3	27	34	16,0	3,62	Fond
4	27	31	15,5	3,51	Fond
5	27	31	13,5	3,06	Fond

Tableau B 2 – Résultats des essais de cohésion en traction sur support POL

Éprouvette	Prof. Min. (mm)	Prof. Max. (mm)	Charge de rupture (kN)	Cohésion (MPa)	Type de rupture
1	29	30	14,0	3,17	Fond
2	30	30	16,0	3,62	Fond
3	30	30	14,0	3,17	Pente, de la surface au fond
4	31	31	15,0	3,40	Surface, 3 mm de béton
5	30	30	16,5	3,73	Fond

Tableau B 3 – Résultats des essais de cohésion en traction sur support SAB

Éprouvette	Prof. Min. (mm)	Prof. Max. (mm)	Charge de rupture (kN)	Cohésion (MPa)	Type de rupture
1	30	31	14,5	3,28	Fond
2	29	31	13,5	3,06	Fond
3	29	31	15,0	3,40	Fond
4	30	31	13,0	2,94	Fond
5	29	30	16,0	3,62	Fond

Tableau B 4 – Résultats des essais de cohésion en traction sur support SCA

Éprouvette	Prof. Min. (mm)	Prof. Max. (mm)	Charge de rupture (kN)	Cohésion (MPa)	Type de rupture
1	31	34	15,5	3,51	Fond
2	29	31	15,0	3,40	De 0 à 5 mm du fond
3	30	32	15,0	3,40	Fond
4	30	31	14,5	3,28	Fond
5	29	31	15,0	3,40	Fond
6	29	31	15,5	3,51	Fond

Tableau B 5 – Résultats des essais de cohésion en traction sur support HYD

Éprouvette	Prof. Min. (mm)	Prof. Max. (mm)	Charge de rupture (kN)	Cohésion (MPa)	Type de rupture
1	19	40	12,5	2,83	Fond
2	15	37	13,5	3,06	Fond
3	27	44	13,5	3,06	En surface, à 25mm du fond
4	24	40	13,0	2,94	Fond
5	25	40	12,5	2,83	Fond

Remarque : 5^e essai : il y avait un vide de 10 mm de diamètre au niveau du plan de rupture sur un des côtés

Tableau B 6 – Résultats des essais de cohésion en traction sur support MP7S

Éprouvette	Prof. Min. (mm)	Prof. Max. (mm)	Charge de rupture (kN)	Cohésion (MPa)	Type de rupture
1	22	36	11,5	2,60	Surface
2	28	38	16,0	3,62	Fond
3	26	37	9,5	2,15	Surface, galette, décohésion granulat
4	26	41	6,5	1,47	Surface, plusieurs fissures à la surface de rupture
5	30	43	9,5	2,15	Surface, galettes, petites fissure sur le coté

Remarque : 1^{er} essai : pic avec fissure dessus

Tableau B 7 – Résultats des essais de cohésion en traction sur support MP14S

Éprouvette	Prof. Min. (mm)	Prof. Max. (mm)	Charge de rupture (kN)	Cohésion (MPa)	Type de rupture
1	23	36	9,5	2,15	Surface, 95% béton – 5% colle
2	29	35	7,5	1,70	Surface, 95% béton – 5% colle
3	26	54	5,5	1,24	Surface
4	22	38	12,0	2,72	Surface
5	22	35	6,0	1,36	Surface

Remarque : 1^{er} essai : vide de 5 mm de diamètre, pente de 6 à 24 mm du fond
 2^e essai : vide de 7 mm de diamètre
 3^e essai : fissure apparente sur côté, pente de 20 à 40 mm, fissure sur le côté

Tableau B 8 – Résultats des essais de cohésion en traction sur support MP21S

Éprouvette	Prof. Min. (mm)	Prof. Max. (mm)	Charge de rupture (kN)	Cohésion (MPa)	Type de rupture
1	14	42	9,5	2,15	Surface, 95% béton – 5% colle
2	25	38	9,0	2,04	Surface
3	10	40	6,0	1,36	Surface
4	20	50	10,8	2,43	Surface, 95% béton – 5% colle
5	30	63	8,0	1,81	Surface, 97% béton – 3% colle

Remarque : 1^{er} essai : fissure sur le côté de 27 mm de long et vide de 15x6 mm
 2^e essai : petite fissure à partir d'un côté, quelques vides
 4^e essai : rupture suit le joint de colle

Essais de la série 2

Tableau B 9 – Résultats des essais de cohésion en traction sur support SAB

Éprouvette	Prof. Min. (mm)	Prof. Max. (mm)	Charge de rupture (kN)	Cohésion (MPa)	Type de rupture
1	31	32	14,7	3,33	Fond
2	31	32	14,1	3,19	Fond, croche
3	31	32	11,8	2,67	Surface
4	30	31	15,5	3,51	Fond
5	30	31	14,2	3,21	Fond, croche

Tableau B 10 – Résultats des essais de cohésion en traction sur support SCA

Éprouvette	Prof. Min. (mm)	Prof. Max. (mm)	Charge de rupture (kN)	Cohésion (MPa)	Type de rupture
1	32	33	12,2	2,76	Fond, croche
2	34	36	11,7	2,65	De 11 à 22 mm du fond
3	31	33	11,1	2,51	Fond
4	30	32	13,0	2,94	De 8 à 20 mm du fond
5	31	32	13,9	3,15	Mi-profondeur
6	32	33	13,1	2,97	De 6 à 16 mm du fond

Tableau B 11 – Résultats des essais de cohésion en traction sur support HYD

Éprouvette	Prof. Min. (mm)	Prof. Max. (mm)	Charge de rupture (kN)	Cohésion (MPa)	Type de rupture
1	30	47	10,1	2,29	De 18 à 30 mm du fond
2	30	47	12,1	2,74	De 5 à 12 mm du fond
3	32	54	9,8	2,22	Surface, de 31 à 40 mm du fond
4	27	54	11,9	2,69	De 16 à 22 mm du fond
5	32	44	12,2	2,76	De 12 à 31 mm du fond
6	29	43	13,6	3,08	De 12 à 20 mm du fond

Tableau B 12 – Résultats des essais de cohésion en traction sur support MP7

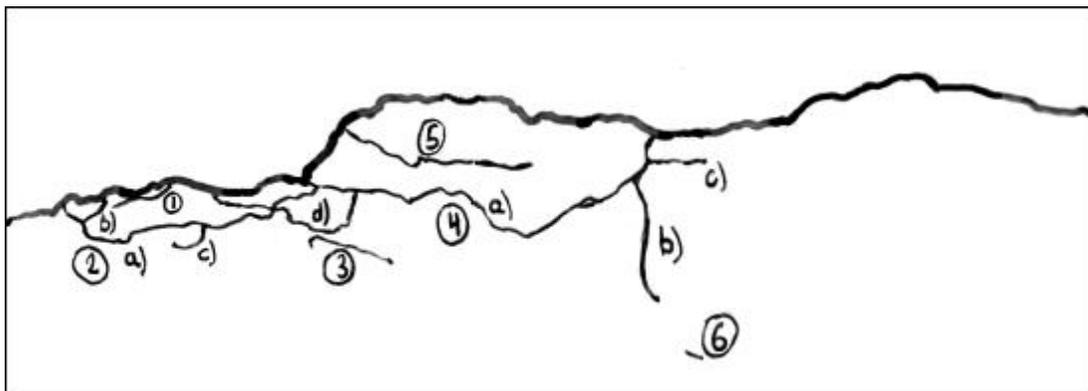
Éprouvette	Prof. Min. (mm)	Prof. Max. (mm)	Charge de rupture (kN)	Cohésion (MPa)	Type de rupture
1	30	45	4,3	0,97	Surface
2	29	46	12,4	2,81	De 14 à 33 mm du fond
3	26	45	9,0	2,04	De 22 à 34 mm du fond
4	26	44	7,0	1,58	Surface
5	32	53	4,9	1,11	Surface
6	28	45	8,6	1,95	Surface

Tableau B 13 – Résultats des essais de cohésion en traction sur support MP14

Éprouvette	Prof. Min. (mm)	Prof. Max. (mm)	Charge de rupture (kN)	Cohésion (MPa)	Type de rupture
1	33	54			
2	30	62	6,4	1,45	Surface
3	30	50	3,7	0,84	Surface
4	32	51	2,5	0,57	Surface
5	30	50	9,0	2,04	Surface
6	29	52	3,7	0,84	Surface

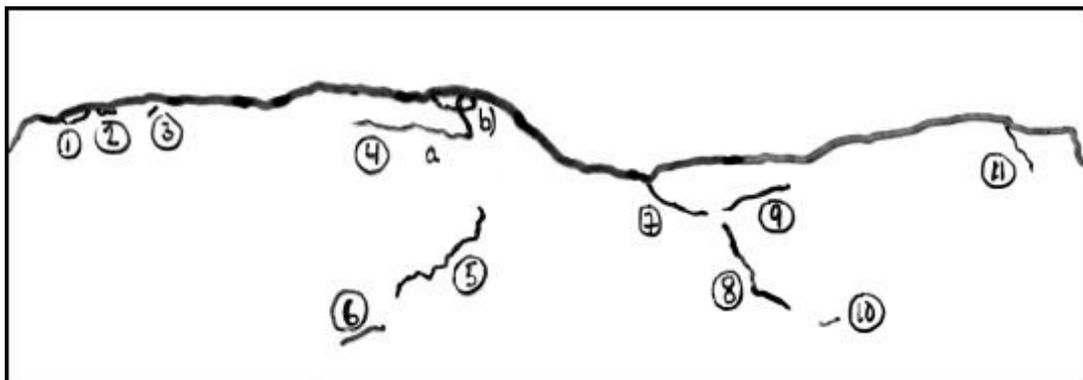
Annexe C
Observations au microscope binoculaire
Chapitre 3

Plaque 0151-1 MP7S



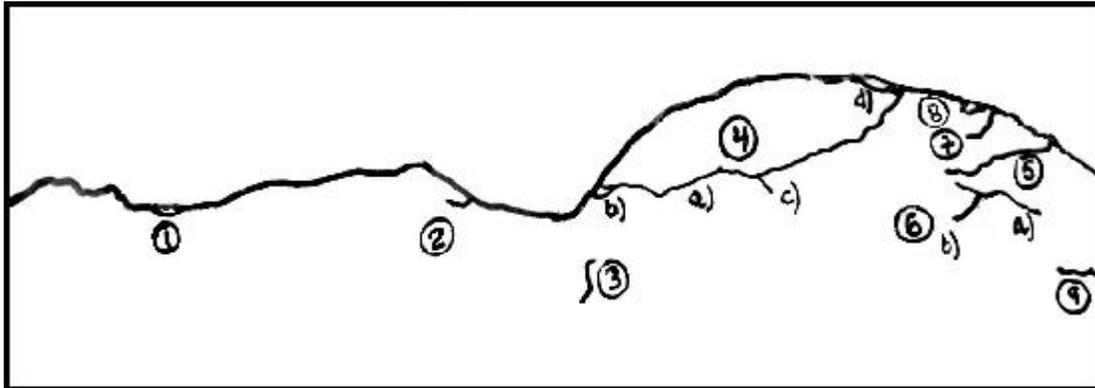
No fissure		Longueur (mm)	Largeur (mm)
1		6,7	< 0,05
2	A	26,0	< 0,05
	B	2,7	< 0,05
	C	4,0	< 0,05
3		8,7	< 0,05
4	A	38,0	0,30-< 0,05
	B	11,3	< 0,05
	C	15,3	< 0,05
	D	4,7	< 0,05
5		20,7	< 0,05
6		1,7	< 0,05
Profondeur maximale (mm)		20,0	

Plaque 0151-1* MP7S



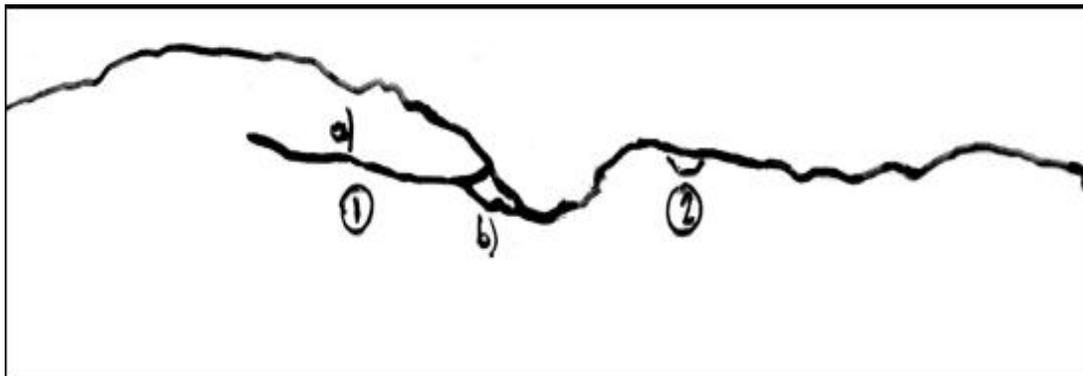
No fissure		Longueur (mm)	Largeur (mm)
1		2,7	< 0,05
2		2,0	< 0,05
3		1,3	< 0,05
4	A	15,3	< 0,05-0,10
	B	4,7	0,10
5		12,7	< 0,05
6		4,7	< 0,05
7		6,0	< 0,05
8		11,3	< 0,05
9		6,7	< 0,05
10		2,0	< 0,05
11		5,3	< 0,05
Profondeur maximale (mm)		22,7	

Plaque 0151-1(3) MP7S



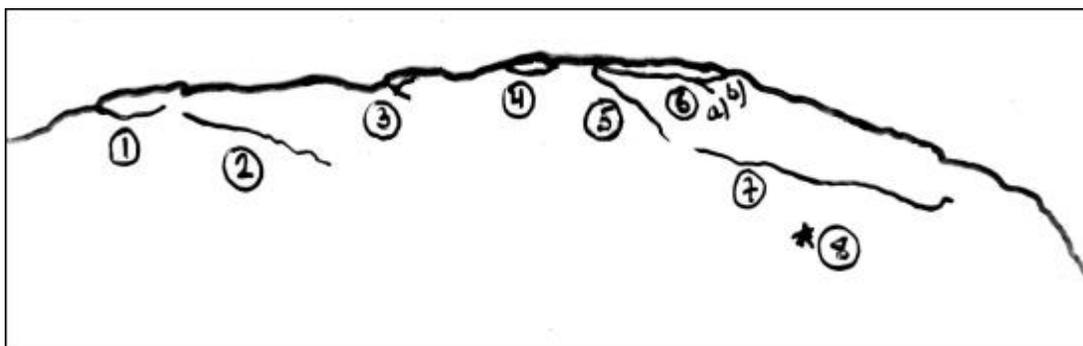
No fissure		Longueur (mm)	Largeur (mm)
1		2,7	< 0,05
2		2,7	< 0,05
3		4,7	< 0,05
4	A	31,3	0,10-< 0,05
	B	2,0	0,10
	C	2,0	0,05
	D	6,0	< 0,05
5		10,0	< 0,05
6	A	8,0	< 0,05
	B	3,3	< 0,05
7		3,3	< 0,05
8		2,7	< 0,05
9		3,3	< 0,05
Profondeur maximale (mm)		11,3	

Plaques 0151-1(3)* MP7S



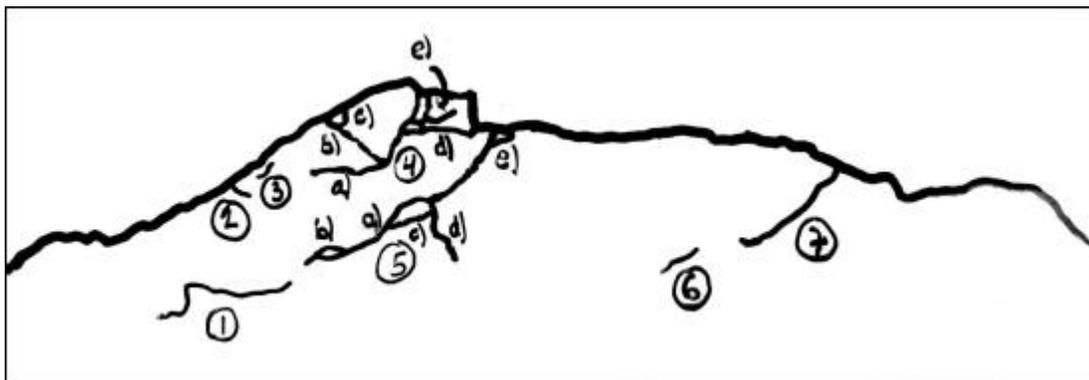
No fissure		Longueur (mm)	Largeur (mm)
1	A	22,7	< 0,05
	B	6,0	0,10
2		4,7	< 0,05
Profondeur maximale (mm)		7,3	

Plaques 0151-2 MP14S



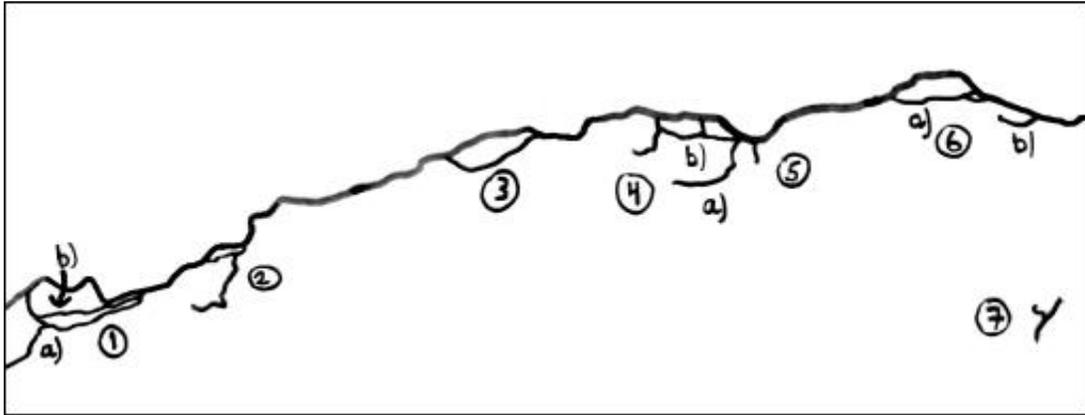
No fissure		Longueur (mm)	Largeur (mm)
1		6,7	0,15-0,2
2		15,3	0,05
3		4,7	< 0,05
4		5,3	< 0,05
5		10,7	< 0,05-0,20
6	A	11,3	< 0,05
	B	2,0	< 0,05
7		26,0	0,10-< 0,05
8		8,7	< 0,05
Profondeur maximale (mm)		13,3	

Plaque 0151-2* MP14S



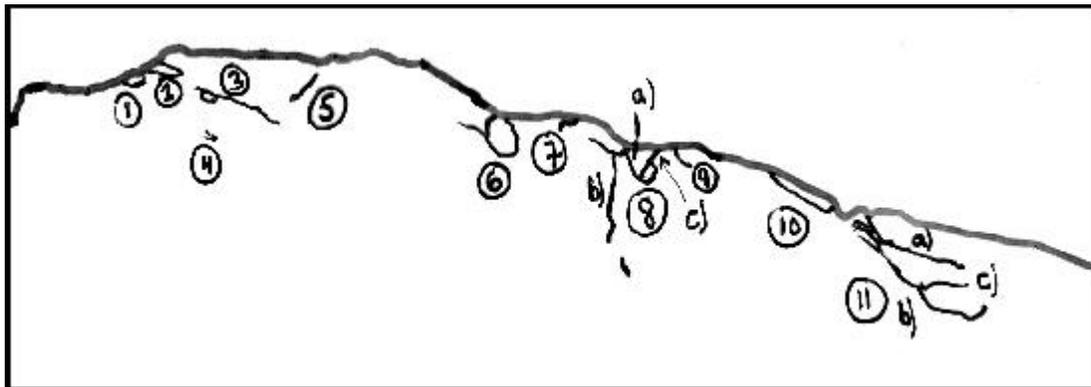
No fissure		Longueur (mm)	Largeur (mm)
1		15,3	0,05
2		2,0	< 0,05
3		2,0	< 0,05
4	A	15,3	< 0,05
	B	6,7	< 0,05
	C	1,7	< 0,05
	D	6,7	0,15
	E	6,7	< 0,05
5	A	22,7	< 0,05
	B	2,7	0,15
	C	4,0	0,05
	D	6,7	0,05
	E	2,7	0,30
6		4,0	0,05
7		12,0	< 0,05
Profondeur maximale (mm)		14,7	

Plaque 0151-2(3) MP14S



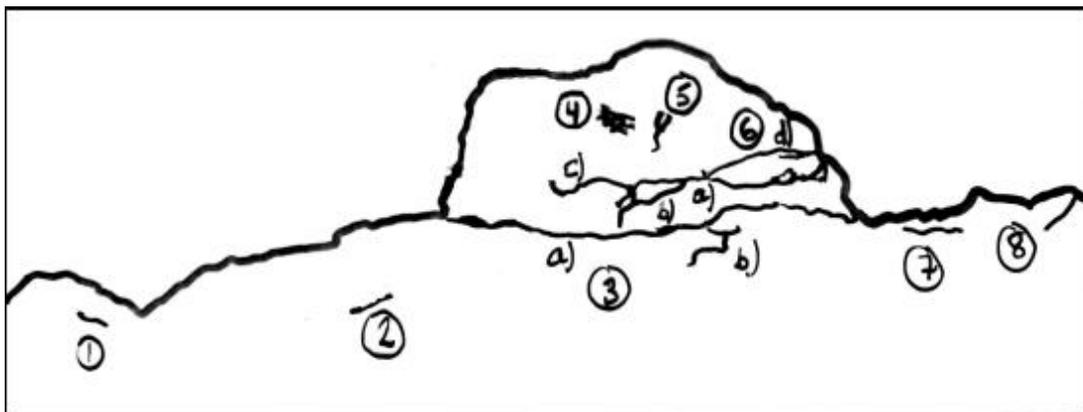
No fissure		Longueur (mm)	Largeur (mm)
1	A	19,3	< 0,05
	B	10,0	< 0,05
2		11,3	0,05
3		15,3	0,05
4	A	10,0	< 0,05
	B	13,3	0,10
5		2,0	0,05
6	A	8,7	0,05-0,10
	B	4,0	0,05
7		6,7	< 0,05
Profondeur maximale (mm)		24,7	

Plaque 0151-2(3)* MP14S



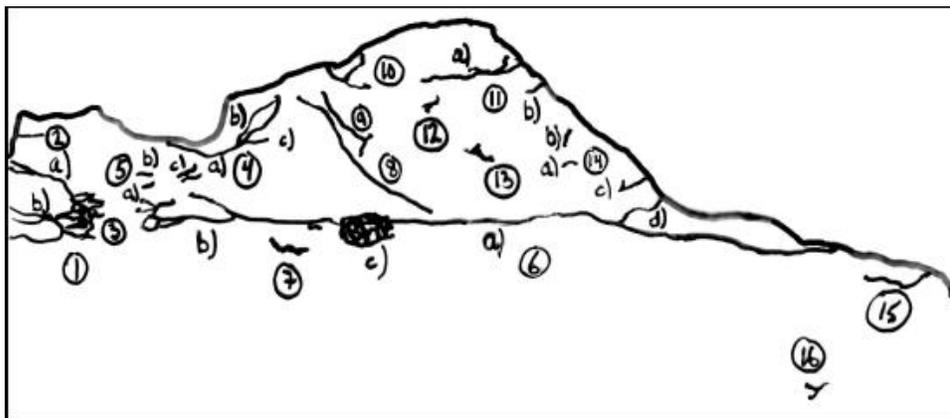
No fissure		Longueur (mm)	Largeur (mm)
1		1,7	0,10
2		4,7	0,15
3		10,7	< 0,05
4		1,3	0,05
5		3,3	< 0,05
6		11,3	0,15
7		2,0	0,15
8	A	9,3	< 0,05
	B	8,7	< 0,05
	C	2,7	< 0,05
9		2,0	0,10
10		6,7	0,05
11	A	10,0	0,15-0,05
	B	7,3	0,05
	C	15,3	0,05
Profondeur maximale (mm)		11,3	

Plaque 0151-3(400) MP21S



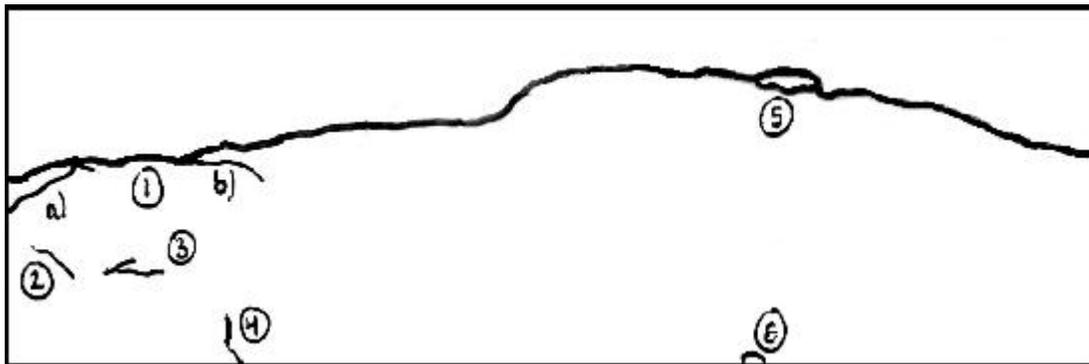
No fissure		Longueur (mm)	Largeur (mm)
1		3,3	< 0,05
2		6,7	< 0,05
3	A	38,7	0,5-0,35
	B	8,7	0,05
4		10,0	< 0,05
5		5,3	< 0,05
6	A	18,7	0,20-0,35
	B	8,0	0,05
	C	9,3	< 0,05
	D	10,7	0,10
7		6,0	0,10-< 0,05
8		4,0	< 0,05
Profondeur maximale (mm)		19,3	

Plaque 0151-3(1000) MP21S



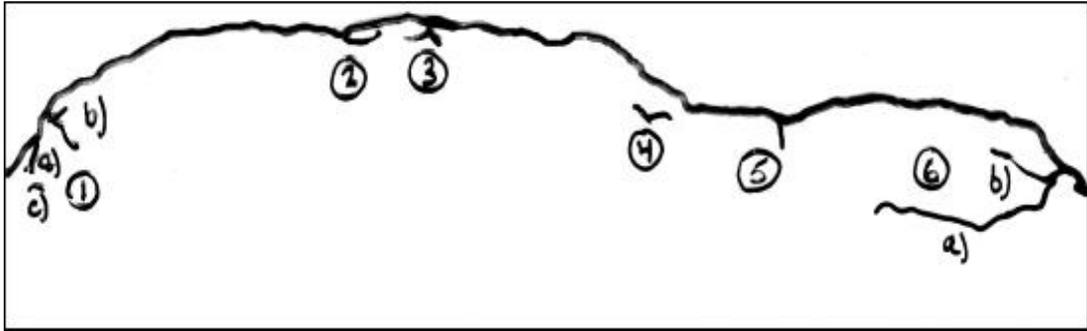
No fissure		Longueur (mm)	Largeur (mm)
1	A	19,3	0,10
	B	12,7	0,10
2		2,7	< 0,05
3		0,0	< 0,05
4	A	14,7	0,25
	B	6,7	0,50
	C	2,7	0,50
5	A	1,3	< 0,05
	B	2,0	< 0,05
	C	4,0	< 0,05
6	A	69,3	< 0,05-0,60-0,25
	B	22,7	< 0,05
	C	0,0	< 0,05
	D	5,3	0,10
7		4,7	< 0,05
8		18,7	< 0,05
9		8,7	< 0,05
10		9,3	< 0,05
11	A	13,3	< 0,05
	B	2,0	< 0,05
12		2,0	< 0,05
13		3,3	< 0,05
14	A	2,0	< 0,05
	B	2,0	< 0,05
	C	4,0	< 0,05
15		7,3	< 0,05
16		5,3	< 0,05
Profondeur maximale (mm)		20,7	

Plaque 0151-3(3) MP21S



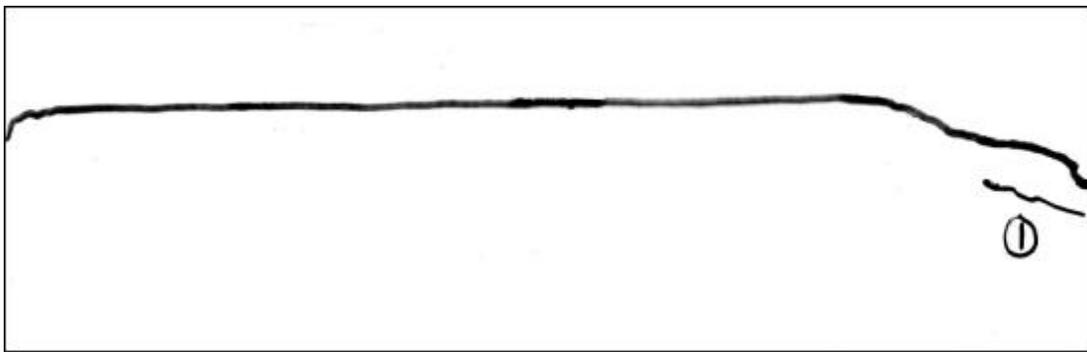
No fissure		Longueur (mm)	Largeur (mm)
1	A	9,3	0,05
	B	7,3	< 0,05
2		4,7	< 0,05
3		7,3	< 0,05
4		5,3	< 0,05
5		6,0	0,35
6		2,7	< 0,05
Profondeur maximale (mm)		24,0	

Plaque 0151-3(3)* MP21S



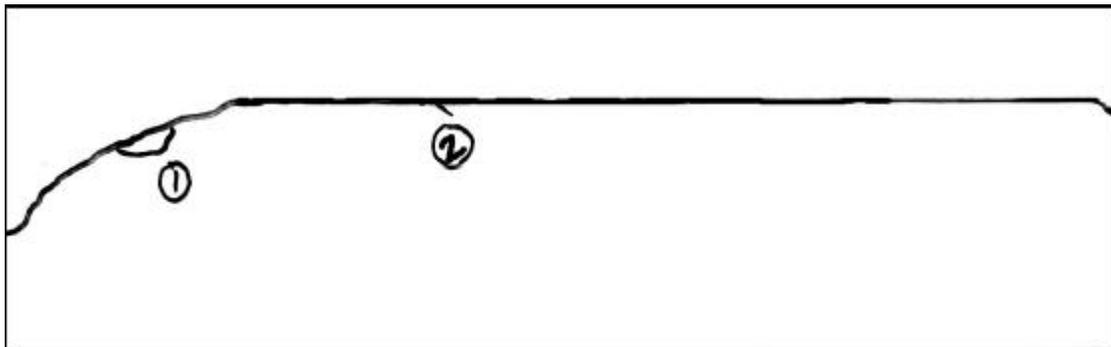
No fissure		Longueur (mm)	Largeur (mm)
1	A	2,7	< 0,05
	B	6,0	< 0,05
	C	1,3	< 0,05
2		4,0	< 0,05
3		4,0	< 0,05
4		4,7	< 0,05
5		2,0	< 0,05
6	A	20,0	< 0,05
	B	6,7	< 0,05
Profondeur maximale (mm)		9,3	

Plaque 0151-4 SCA



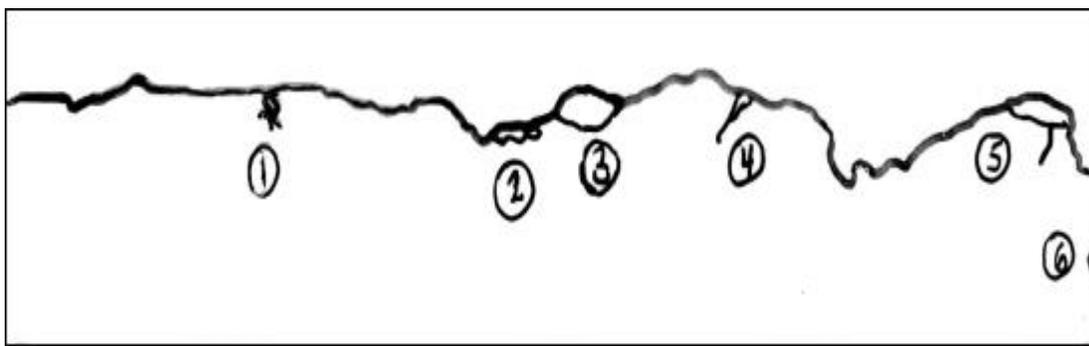
No fissure		Longueur (mm)	Largeur (mm)
1		10	< 0,05
Profondeur maximale (mm)		4	

Plaque 0151-4* SCA



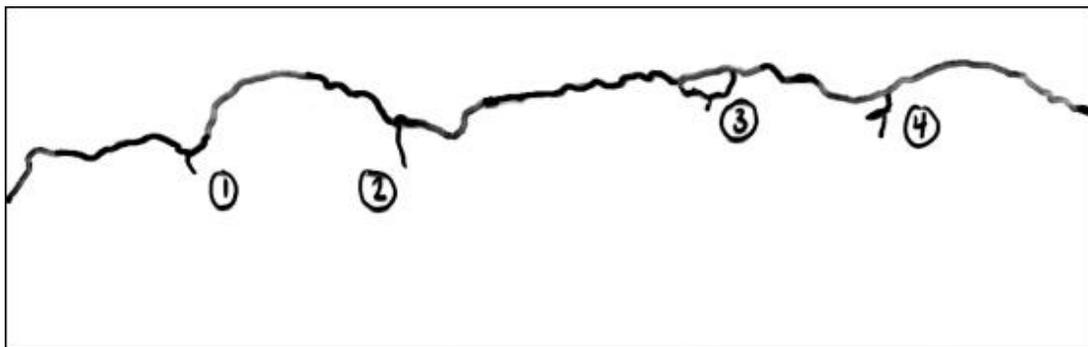
No fissure	Longueur (mm)	Largeur (mm)
1	6,7	0,15
2	2,0	< 0,05
Profondeur maximale (mm)	2,0	

Plaque 0151-5 HYD



No fissure	Longueur (mm)	Largeur (mm)
1	5,3	< 0,05
2	4,7	< 0,05
3	6,7	< 0,05
4	6,0	< 0,05
5	8,7	< 0,05
6	5,3	0,15
Profondeur maximale (mm)	7,3	

Plaque 0151-5* HYD



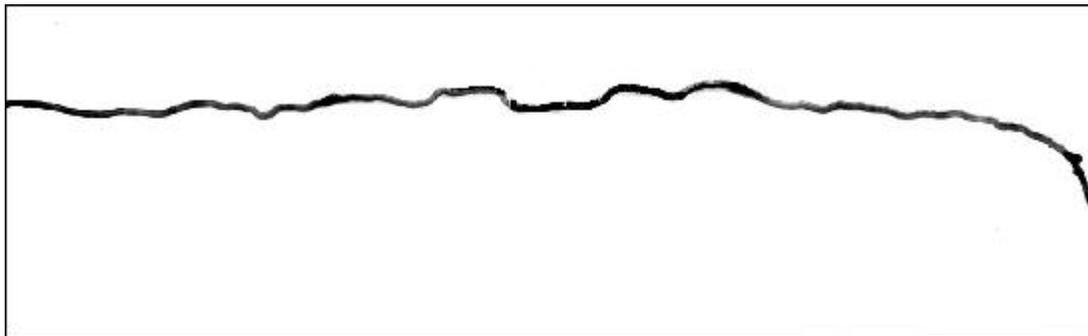
No fissure	Longueur (mm)	Largeur (mm)
1	2,0	< 0,05
2	4,0	< 0,05
3	8,7	< 0,05
4	6,0	< 0,05
Profondeur maximale (mm)	4,0	

Plaque 0151-5 SAB



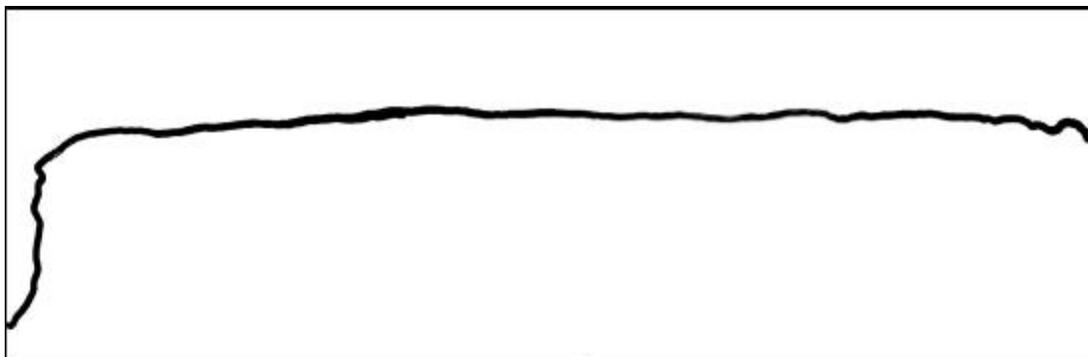
No fissure	Longueur (mm)	Largeur (mm)
1	12,0	< 0,05
2	2,7	< 0,05
3	8,0	< 0,05
Profondeur maximale (mm)	12,0	

Plaque 0151-5* SAB



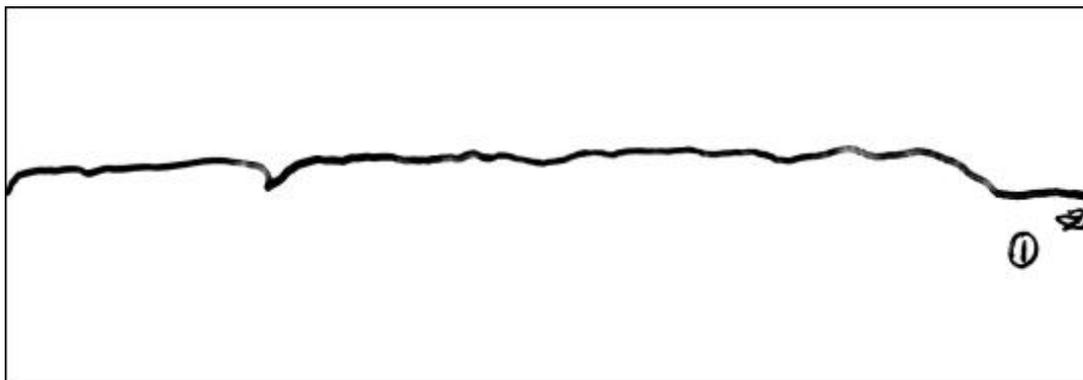
Aucune fissure

Plaque 0151-6 POL



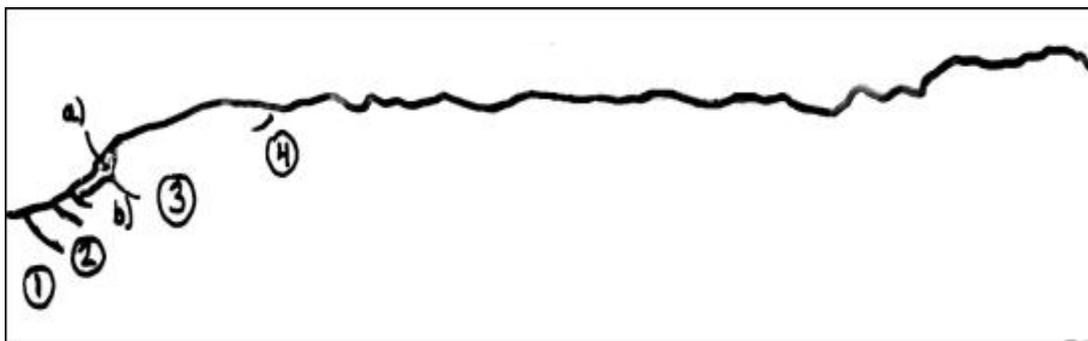
Aucune fissure

Plaque 0151-6* POL



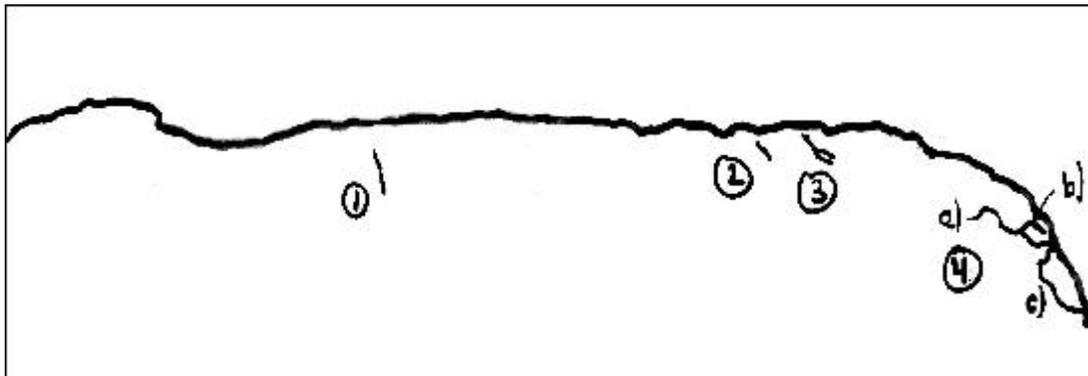
No fissure	Longueur (mm)	Largeur (mm)
1	8,7	< 0,05
Profondeur maximale (mm)	2,7	

Plaque 0151-6 NAT



No fissure	Longueur (mm)	Largeur (mm)
1	4,7	< 0,05
2	2,7	< 0,05
3	A	8,0
	B	3,3
4	2,7	< 0,05
Profondeur maximale (mm)	4,0	

Plaque 0151-6* NAT



No fissure		Longueur (mm)	Largeur (mm)
1		4,0	0,05
2		2,7	< 0,05
3		4,7	0,05
4	A	10,0	0,05
	B	2,7	0,05
	C	8,0	0,10-0,05
Profondeur maximale (mm)		4,7	

Annexe D
Résultats des essais de caractérisation quantitative
Chapitre 4

Essais sur dalles de béton projeté

Tableau D 1 – Essais pour des ancrages chimiques de 6,4 mm de diamètre à une profondeur de forage de 15 mm

Éprouvette	Profondeur (mm)	Force de rupture (kN)	Force réelle (kN)
1	15	5,2	5,5
2	15	4,1	4,4
3	15	4,3	4,6
4	15	4,2	4,5
5	15	4,3	4,6
6	15	3,4	3,7

Tableau D 2 – Essais pour des ancrages chimiques de 6,4 mm de diamètre à une profondeur de forage de 20 mm

Éprouvette	Profondeur (mm)	Force de rupture (kN)	Force réelle (kN)
1	20	3,7	4,0
2	20	6,8	7,1
3	20	6,8	7,1
4	20	5,6	5,9
5	20	4,6	4,9
6	20	5,1	5,4
7	20	6	6,3
8	20	4,9	5,2

Tableau D 3 – Essais pour des ancrages chimiques de 9,5 mm de diamètre à une profondeur de forage variant entre 10 et 15 mm

Éprouvette	Profondeur (mm)	Force de rupture (kN)	Force réelle (kN)
1	16	3,6	3,9
2	10	0,9	1,0
3	11	2,5	2,8
4	11	1,0	1,1
5	13	1,9	2,1
6	15	2,7	3,0
7	12	2,5	2,8

Note: les profondeurs entre 10 et 15 mm pour cet ancrage ne sont pas appropriées

Tableau D 4 – Essais pour des ancrages chimiques de 9,5 mm de diamètre à une profondeur de forage de 20 mm

Éprouvette	Profondeur (mm)	Force de rupture (kN)	Force réelle (kN)
1	20	7,9	8,2
2	20	7,8	8,1
3	20	7,2	7,5
4	20	7,4	7,7
5	20	7,2	7,5
6	20	7,4	7,7
7	20	7,5	7,8
8	20	6,9	7,2

Tableau D 5 – Essais pour des ancrages chimiques de 9,5 mm de diamètre à une profondeur de forage de 25 mm

Éprouvette	Profondeur (mm)	Force de rupture (kN)	Force réelle (kN)
1	25	8,1	8,4
2	25	11,0	11,2
3	25	11,3	11,5
4	25	9,4	9,7
5	25	10,4	10,6
6	25	10,5	10,7

Tableau D 6 – Essais pour des ancrages mécaniques de 6,4 mm de diamètre à une profondeur de forage de 15 mm

Éprouvette	Couple (pi·lb)	Profondeur (mm)	Force de rupture (kN)	Force réelle (kN)
1	5	14	1,9	2,1
2	5	15	1,8	2,0
3	5	14	1,8	2,0

Note: les valeurs sont trop faibles pour permettre une évaluation quantitative de la résistance du béton

Tableau D 7 – Essais pour des ancrages mécaniques de 6,4 mm de diamètre à une profondeur de forage de 20 mm

Éprouvette	Couple (pi·lb)	Profondeur (mm)	Force de rupture (kN)	Force réelle (kN)
1	5	20	6,8	7,1
3	10	20	6,8	7,1
4	5	20	6,5	6,8
5	5	20	6,5	6,8
6	5	20	7,4	7,7
7	5	20	5,9	6,2
8	5	20	7,4	7,7

Note: plateau observé environ à 4,5 kN

Tableau D 8 – Essais pour des ancrages mécaniques de 9,5 mm de diamètre à une profondeur de forage de 25 mm

Éprouvette	Couple (pi·lb)	Profondeur (mm)	Force de rupture (kN)	Force réelle (kN)
1	20	25	12,5	12,7
2	20	25	11,0	11,2
3	20	25	10,7	10,9
4	20	25	11,0	11,2
5	20	25	11,1	11,3
6	20	25	13,8	14,0
7	30	25	11,7	11,9

Note: plateau observé entre 6,7 et 7,3 kN

Tableau D 9 – Effet de la profondeur de forage à partir d’ancrages chimiques de 9,5 mm de diamètre (partie 1)

N° essai	Profondeur de forage (mm)	Temps de l'essai (sec.)	Force de rupture (kN)	Force réelle (kN)
1	15	27	4,8	5,1
2	15	27	4,9	5,2
3	15	20	3,9	4,2
4	15	23	4,1	4,4
5	15	28	5,0	5,3
6	15	27	4,7	5,0
7	20	26	4,9	5,2
8	20	31	5,6	5,9
9	20	36	6,7	7,0
10	20	25	5,0	5,3
11	20	27	4,8	5,1
12	20	36	6,6	6,9
13	25	24	5,7	6,0
14	25	35	7,5	7,8
15	25	45	8,6	8,9

Tableau D 10 – Effet de la profondeur de forage à partir d’ancrages chimiques de 9,5 mm de diamètre (partie 2)

N° essai	Profondeur de forage (mm)	Temps de l'essai (sec.)	Force de rupture (kN)	Force réelle (kN)
16	25	46	9,7	10,0
17	25	37	6,8	7,1
18	25	60	5,4	5,7
19	30	30	6,4	6,9
20	30	35	6,1	6,4
21	30	36	6,6	6,9
22	30	51	9,2	9,5
23	30	62	11,3	11,5
24	30	40	7,9	8,2

Essais sur dalles de béton coulé

Tableau D 11 – Essais de pull-out foré

Éprouvette	Dalle de béton C1			Dalle de béton C3		
	Force de rupture (kN)	Force réelle (kN)	F'c (MPa)	Force de rupture (kN)	Force réelle (kN)	F'c (MPa)
1	26,2	26,3	26,6	28,5	28,5	29,4
2	29,1	29,1	30,2	33,4	33,3	35,4
3	30,5	20,5	31,9	32,0	31,9	33,7
4	25,6	25,7	25,9	32,7	32,6	34,5
5	31,2	31,2	32,7	36,2	36,0	38,8
6	29,0	29,0	30	35,0	34,8	37,3
7	28,3	28,4	29,2	31,4	31,4	33,0
8	31,7	31,7	33,3	26,9	27,0	27,5

Tableau D 12 – Essais de cohésion en traction sur dalle de béton C3 pour une profondeur de carottage de 20 mm

Éprouvette	Force de rupture (kN)	Force réelle (kN)	Ft (MPa)	Rupture
1	17,1	17,3	3,92	Fond
2	15,7	15,9	3,60	Fond
3	18,4	18,5	4,19	Fond
4	17,9	18,1	4,10	Fond
5	17,1	17,3	3,92	Fond
6	16,0	16,2	3,67	Fond
7	17,7	17,9	4,05	Fond
8	17,5	17,7	4,01	Fond

Tableau D 13 – Essais de cohésion en traction sur dalle de béton C1 pour une profondeur de carottage de 20 mm

Éprouvette	Force de rupture (kN)	Force réelle (kN)	Ft (MPa)	Type de rupture
1	14,9	15,1	3,42	Près de la surface
2	13,3	13,5	3,06	Fond
3	14,6	14,8	3,35	Mi-profondeur / fond
4	14,1	14,3	3,24	Oblique: fond / surface
5	14,4	14,6	3,30	Surface
6	14,4	14,6	3,30	Milieu, déchaussement d'un granulat à cet endroit
7	13,6	13,8	3,12	Fond
8	14,8	15,0	3,40	À 5 mm du fond

Tableau D 14 – Essais avec ancrage chimiques sur dalle de béton C3 pour une profondeur de forage de 15 mm

Éprouvette	Diamètre de l'ancrage (mm)	Force de rupture (kN)	Force réelle (kN)	Type de rupture
1	6,4	3,7	4,0	Cône
2	9,5	4,0	4,3	Cône
3	6,4	4,0	4,3	Cône
4	9,5	3,8	4,1	Cône
5	6,4	3,2	3,5	Cône
6	6,4	3,8	4,1	Pas cône
7	9,5	4,2	4,5	Cône
8	6,4	4,0	4,3	Pas cône
9	6,4	3,3	3,6	Pas cône
10	9,5	3,6	3,9	Cône
11	9,5	4,2	4,5	Cône
12	6,4	4,0	4,3	Pas cône
13	9,5	4,2	4,5	Cône
14	9,5	4,2	4,5	Cône
15	6,4	3,4	3,7	Pas cône
16	9,5	4,5	4,8	Cône

Tableau D 15 – Essais avec ancrages chimiques sur dalle de béton C3 pour une profondeur de forage de 20 mm

Éprouvette	Diamètre de l'ancrage (mm)	Force de rupture (kN)	Force réelle (kN)	Type de rupture
1	6,4	5,5	5,8	Cône
2	9,5	6,4	6,7	Pas de cône
3	6,4	5,7	6,0	Pas de cône
4	9,5	6,8	7,1	Cône
5	6,4	5,9	6,2	Cône
6	9,5	6,1	6,4	Cône
7	6,4	5,2	5,5	Cône
8	9,5	6,9	7,2	Cône
9	6,4	5,4	5,7	Pas de cône
10	9,5	7,2	7,5	Pas de cône
11	6,4	5,5	5,8	Cône
12	9,5	6,9	7,2	Cône
13	6,4	6,2	6,5	Pas de cône
14	9,5	7,3	7,6	Cône
15	6,4	6,3	6,6	Pas de cône
16	9,5	6,3	6,6	Pas de cône

Tableau D 16 – Essais avec ancrages de 9,5 mm de diamètre sur dalle de béton C1 pour une profondeur de forage de 20 mm

Éprouvette	Force de rupture (kN)	Force réelle (kN)
1	4,9	5,2
2	4,5	4,8
3	4,8	5,1
4	6,3	6,6
5	5,9	6,2
6	5,4	5,7
7	4,7	5,0
8	5,4	5,7

Essais sur supports préparés

Tableau D 17 – Essais accélérés de cohésion sur les côtés des supports préparés

Côtés du support 1			Côtés du support 2			Côtés du support 3		
Force de rupture (kN)	Temps (sec.)	Force réelle (kN)	Force de rupture (kN)	Temps (sec.)	Force réelle (kN)	Force de rupture (kN)	Temps (sec.)	Force réelle (kN)
3,7	21	4,0	5,2	25	5,5	4,5	26	4,8
5,4	28	5,7	5,3	25	5,6	5,4	27	5,7
4,2	22	4,5	5,3	26	5,6	5,3	27	5,6
5,6	26	5,9	5,1	28	5,4	5,0	26	5,3
4,5	24	4,8	4,9	24	5,2	5,1	26	5,4
5,0	26	5,3	5,5	27	5,8	4,6	23	4,9
4,2	22	4,5	5,1	24	5,4	5,3	26	5,6
4,8	25	5,1	5,4	26	5,7	5,3	26	5,6
5,6	29	5,9	5,2	26	5,5	4,0	23	4,3
5,1	26	5,4	5,4	28	5,7	3,9	20	4,2
4,8	24	5,1	5,4	28	5,7	5,2	27	5,5
4,6	26	4,9	5,8	30	6,1	5,0	25	5,3
5,6	28	5,9	5,4	28	5,7	4,8	24	5,1
5,2	28	5,5	5,1	26	5,4	4,8	25	5,1
5,2	26	5,5	5,1	25	5,4	4,5	23	4,8
4,8	24	5,1	5,4	26	5,7	4,7	23	5,0

Légende : Surface sablée (SAB)
 Surface naturelle (NAT)

Tableau D 18 – Essais accélérés de cohésion sur la surface MP9 du support 1

Éprouvette	Profondeur moyenne (mm)	Force de rupture (kN)	Temps de l'essai (sec.)	Force réelle (kN)
1	17,0	3,3	19	3,6
2	17,0	4,5	25	4,8
3	18,4	3,9	19	4,2
4	17,5	5,8	30	6,1
5	17,9	2,7	20	3,0
6	17,7	5,3	26	5,6
7	19,0	6,3	30	6,6
8	19,3	5,0	26	5,3
9	19,0	6,8	34	7,1
10	16,9	4,4	23	4,7
11	17,7	4,5	21	4,8
12	21,6	3,6	17	3,9

Tableau D 19 – Essais accélérés de cohésion sur la surface MP11 du support 2

Éprouvette	Profondeur moy. (mm)	Force de rupture (kN)	Temps de l'essai (sec.)	Force réelle (kN)
1	17,6	4,7	23	5,0
2	17,6	3,8	22	4,1
3	17,5	5,1	27	5,4
4	17,3	5,3	26	5,6
5	18,9	5,1	27	5,4
6	18,8	6,1	30	6,4
7	18,1	3,4	26	3,7
8	17,2	4,3	23	4,6
9	18,1	4,6	25	4,9
10	17,8	3,2	16	3,5
11	18,2	5,2	26	5,5
12	18,4	3,8	20	4,1

Tableau D 20 – Essais accélérés de cohésion sur la surface MP34 du support 3

Éprouvette	Profondeur moy. (mm)	Force de rupture (kN)	Temps de l'essai (sec.)	Force réelle (kN)
1	16,9	4,7	26	5,0
2	17,9	3,7	19	4,0
3	15,7	2,3	29	2,6
4	16,6	4,2	23	4,5
5	18,5	5,8	31	6,1
6	20,7	6,2	34	6,5
7	18,2	5,0	24	5,3
8	19,1	5,5	27	5,8
9	17,2	5,6	26	5,9
10	18,4	5,1	28	5,4
11	16,6	2,6	19	2,9
12	17,7	4,6	23	4,9

Tableau D 21 – Essais au marteau Schmidt sur les côtés du support 1

Éprouvette	NAT1 (MPa)	NAT2 (MPa)	SAB1 (MPa)	SAB2 (MPa)
1	45,2	49,5	43,0	43,0
2	45,2	44,1	45,2	45,2
3	45,2	49,5	45,2	38,7
4	51,6	49,5	46,3	51,6
5	43,0	43,0	39,8	40,9
6	45,2	44,1	49,5	40,9
7	47,3	52,7	46,3	45,2
8	51,6	44,1	51,6	40,9
9	47,3	51,6	43,0	49,5
10	44,1	43,0	38,7	49,5

Tableau D 22 – Essais au marteau Schmidt sur les côtés du support 2

Éprouvette	NAT1 (MPa)	NAT2 (MPa)	SAB1 (MPa)	SAB2 (MPa)
1	47,3	47,3	51,6	51,6
2	58,1	53,8	49,5	48,4
3	55,9	53,8	49,5	49,5
4	54,9	48,4	52,7	53,8
5	54,9	58,1	49,5	51,6
6	43,0	53,8	49,5	49,5
7	49,5	51,6	45,2	47,3
8	32,3	51,6	47,3	51,6
9	50,6	49,5	50,6	50,6
10	52,7	44,1	47,3	46,3

Tableau D 23 – Essais au marteau Schmidt sur les côtés du support 3

Éprouvette	NAT1 (MPa)	NAT2 (MPa)	SAB1 (MPa)	SAB2 (MPa)
1	57,0	51,6	54,9	55,9
2	47,3	40,9	55,9	46,3
3	55,9	47,3	51,6	47,3
4	57,0	43,0	45,2	49,5
5	51,6	39,8	51,6	44,1
6	47,3	37,7	47,3	45,2
7	51,6	43,0	47,3	44,1
8	45,2	53,8	45,2	53,8
9	53,8	51,6	53,8	51,6
10	51,6	50,6	45,2	45,2

Tableau D 24 – Essais au marteau Schmidt sur les surfaces préparées des supports

Éprouvette	MP9 (MPa)	MP11 (MPa)	MP34 (MPa)	Éprouvette	MP9 (MPa)	MP11 (MPa)	MP34 (MPa)
1	23,0	26,8	13,4	14	31,6	12,5	28,7
2	20,1	8,6	13,4	15	23,9	11,5	22,0
3	20,1	25,9	31,6	16	38,3	17,2	15,3
4	23,0	22,0	23,0	17	28,7	28,7	30,7
5	30,7	22,0	38,3	18	24,9	24,9	16,3
6	23,0	32,6	26,8	19	24,9	23,0	26,8
7	36,4	19,2	34,5	20	11,5	8,6	30,7
8	14,4	11,5	26,8	21	31,6	17,2	11,5
9	19,2	28,7	26,8	22	21,1	27,8	23,9
10	34,5	26,8	19,2	23	24,9	23,9	21,1
11	44,1	28,7	23,0	24	23,0	27,8	19,2
12	21,1	8,6	11,5	25	23,0	18,2	29,7
13	21,1	27,8	38,3				

Annexe E
Résultats des essais d'adhérence
Chapitre 5

Essais de la série 1

Tableau E 1 – Résultats des essais d'adhérence sur support NAT

Éprouvette	Prof. moyenne (mm)	Charge de rupture (kN)	Adhérence (MPa)	Type de rupture
1	109	13,50	3,06	Fond
2	108	7,50	1,70	Réparation, 32 mm
3	108	8,25	1,87	Réparation, 25 mm
4	106	7,00	1,58	Interface, 85 mm
5	106	12,50	2,83	Interface, 85 mm

Remarque : 2^e essai : présence d'un vide sur le côté

Tableau E 2 – Résultats des essais d'adhérence sur support SAB

Éprouvette	Prof. moyenne (mm)	Charge de rupture (kN)	Adhérence (MPa)	Type de rupture
1	109	9,50	2,15	Interface, 80 mm
2	107	9,75	2,21	Interface, 80 mm
3	105	9,50	2,15	Interface, 80 mm
4	105	12,00	2,72	Interface, 80 mm
5	104	10,00	2,26	Interface, 80 mm

Tableau E 3 – Résultats des essais d'adhérence sur support SCA

Éprouvette	Prof. moyenne (mm)	Charge de rupture (kN)	Adhérence (MPa)	Type de rupture
1	105	10,50	2,38	Interface, 75 mm
2	105	8,75	1,98	Interface, 75 mm
3	107	10,50	2,38	Interface, 80 mm
4	119	13,00	2,94	Interface, 80 mm
5	105	8,25	1,87	Interface, 80 mm

Tableau E 4 – Résultats des essais d'adhérence sur support HYD

Éprouvette	Prof. moyenne (mm)	Charge de rupture (kN)	Adhérence (MPa)	Type de rupture
1	115	8,00	1,81	Interface+réparation, 90 mm
2	115	12,75	2,89	Fond
3	111	7,00	1,58	Interface+réparation
4	114	13,50	3,06	Support près de l'interface, 90 mm
5	115	11,75	2,66	Interface, 75 mm

Remarque : 3^e essai : plusieurs vides présents autour de la carotte

Tableau E 5 – Résultats des essais d'adhérence sur support MP7S

Éprouvette	Prof. moyenne (mm)	Charge de rupture (kN)	Adhérence (MPa)	Type de rupture
1	117	7,50	1,70	Interface, 85 mm
2	118	7,00	1,58	Interface, 80 mm
3	116	8,00	1,81	Interface, 85 mm
4	116	10,00	2,26	75%interface-25%substrat, 85 mm
5	118	8,00	1,81	75%interface-25%substrat, 85 mm

Tableau E 6 – Résultats des essais d'adhérence sur support MPI4S

Éprouvette	Prof. moyenne (mm)	Charge de rupture (kN)	Adhérence (MPa)	Type de rupture
1	119	4,00	0,91	Substrat, près de l'interface, 90 mm
2	122	5,00	1,13	Substrat+interface, 95 mm
3	122	3,50	0,79	50%int-50%substrat, 85 mm
4	122	6,00	1,36	30%int-70%substrat, 90 mm
5	111	7,00	1,58	Interface, 90 mm

Tableau E 7 – Résultats des essais d'adhérence sur support MP21S

Éprouvette	Prof. moyenne (mm)	Charge de rupture (kN)	Adhérence (MPa)	Type de rupture
1	135	6,50	1,47	Interface, 115 mm
2	134	4,00	0,91	Interface + substrat, 105 mm
3	129	5,00	1,13	60%interface-40%substrat, 100 mm
4	127	4,50	1,02	Interface, 100mm
5	133	1,00	0,23	Interface + substrat, 100 mm*

Remarque : 5^e essai : fissure tout le long de la carotte

Essais de la série 2

Tableau E 8 – Résultats des essais d'adhérence sur support SAB

Éprouvette	Prof. moyenne (mm)	Charge de rupture (kN)	Adhérence (MPa)	Type de rupture
1	110	8,7	1,97	Interface, 80 mm
2	110	11,2	2,54	Interface, 75-80 mm
3	109	12,4	2,81	Interface, 80 mm
4	109	12,6	2,85	Interface, 80 mm
5	110	10,9	2,47	Interface, 78 mm

Tableau E 9 – Résultats des essais d'adhérence sur support SCA

Éprouvette	Prof. moyenne (mm)	Charge de rupture (kN)	Adhérence (MPa)	Type de rupture
1	110	10,8	2,44	Interface, 75 mm
2	110	9,3	2,11	Interface, 75-78 mm
3	110	8,2	1,86	Interface, 73-75 mm
4	110	10,4	2,35	Interface, 70-75 mm
5	111	7,5	1,70	Interface, 70-75 mm

Tableau E 10 – Résultats des essais d'adhérence sur support HYD

Éprouvette	Prof. moyenne (mm)	Charge de rupture (kN)	Adhérence (MPa)	Type de rupture
1	120	9,9	2,24	Interface, 80-97 mm
2	121	6,7	1,52	Interface, 82-98 mm
3	120	7,0	1,58	Interface, 79-100 mm
4	120	7,5	1,70	Interface, 92-105 mm
5	120	9,6	2,17	Interface, 80-95 mm
6	120	6,6	1,49	Interface, 90-102 mm

Tableau E 11 – Résultats des essais d'adhérence sur support MP7

Éprouvette	Prof. moyenne (mm)	Charge de rupture (kN)	Adhérence (MPa)	Type de rupture
1	120	2,4	0,54	Interface, 100 mm
2	120	8,5	1,92	Interface, 92-102 mm
3	120	8,7	1,97	Interface, 90-100 mm
4	117	6,9	1,56	Interface, 90-100 mm
5	120	6,6	1,49	Interface, 93-103 mm
6	120	5,2	1,18	Interface, 110-118 mm

Remarque : 1^{er} essai : résidus blancs dans la zone de rupture, 1/2 de la surface

Tableau E 12 – Résultats des essais d'adhérence sur support MP14

Éprouvette	Prof. moyenne (mm)	Charge de rupture (kN)	Adhérence (MPa)	Type de rupture
1	126	3,7	0,84	50/50 – substrat/interface
2	125	2,5	0,57	Interface, 95-110 mm
3	127	4,9	1,11	50/50 – substrat/interface, 104-115 mm
4	125	2,3	0,52	Interface, 100-106 mm
5	125	5,3	1,20	95% support, 5% interface
6	126	2,2	0,50	Substrat et interface, 100-120 mm, 97-105 mm réparation

Remarque : 2^e et 4^e essais : résidus blancs dans la zone de rupture, 1/4 de la surface