

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Faculté de génie

Département de génie civil

L'EFFET DU VIEILLISSEMENT
DES INJECTIONS DE COULIS SUR
LES BARRAGES QUÉBÉCOIS

Mémoire de maîtrise
Spécialité : génie civil

Nicolas NÉRON

Sherbrooke (Québec) Canada

Mars 2020

MEMBRES DU JURY

Patrice RIVARD

Directeur

Richard GAGNÉ

Rapporteur

Marco QUIRION

Évaluateur

Résumé

Au Québec, plusieurs ouvrages hydroélectriques de grande envergure tel que les barrages-poids ont été construits dans le dernier quart du 20^e siècle. Ces barrages faisant partie du projet provincial de nationalisation de l'électricité permettent l'alimentation en énergie verte de la majeure partie de la population québécoise tout en contribuant au maintien économique de certaines régions administratives. Ces ouvrages sont toutefois soumis à des conditions climatiques très difficiles amenées par des hivers rigoureux et ainsi que par des rayonnements solaires prolongés au cours de l'été. Par conséquent, la détérioration des constructions semble inévitable, entraînant parfois l'apparition de fissures sur les parois ou encore une dégradation ciblée des injections de coulis de ciment.

La présente étude qui est orientée en mécanique des roches vise à analyser l'état de ces réparations par injections qui semblent subir un vieillissement autant sur les parois des ouvrages que dans leurs fondations rocheuses. Plus précisément, cette recherche tente d'identifier les principaux facteurs de dégradation des injections de coulis de ciment de façon accélérée. Il sera alors possible de quantifier l'influence que la détérioration des joints peut avoir sur le long terme. Suite à une recherche effectuée dans la littérature, il a été mis en avant que l'érosion et la dissolution par écoulement étaient les deux principaux agents de dégradation des joints cimentaires. Par conséquent, les dimensionnements de montages de dégradation par écoulement ainsi que des échantillons imitant un joint rocheux injecté, ont dû être réalisés. Les objectifs des montages étaient d'accueillir six échantillons et d'y faire circuler un fluide en circuit fermé pour une période avoisinant deux mois. Quant aux échantillons, ils étaient composés de deux surfaces éloignées de 1 mm et présentant un JRC (coefficient de rugosité défini empiriquement) d'environ 13, le tout encastré dans un bâti quasi étanche. La première surface était constituée soit de Sika 212 (mortier normalisé) où la rugosité était obtenue par la réplique de silicone ou de granite taillé. La deuxième surface était constituée de coulis de ciment (E/C = 0,5) directement coulé sur la première partie de l'échantillon pour être ensuite détaché. Deux fluides contrôlés (pH, température et pression) ont été utilisés pour dégrader les cinq (5) différentes séries d'échantillons : l'eau, afin d'obtenir une dégradation près de la réalité et de l'acide citrique (pH = 5) pour obtenir une dégradation accélérée des joints.

Plusieurs essais et analyses ont permis de définir l'évolution des différents types de dégradations (neutre/acide, Sika/granite, temps) : examens au microscope à balayage électronique, analyse chimique des fluides en recirculation, essais de résistance au cisaillement direct ainsi que numérisation des interfaces avant/après dégradation (variation du coefficient de rugosité). Les résultats obtenus ont dans un premier temps permis de valider la reproductibilité des échantillons et de dissiper les doutes entourant l'addition de facteurs de dégradation non prévus lors de la dégradation par acide (principalement érosion et dissolution). Une baisse de résistance globale au cisaillement des joints a été observée, baisse qui s'accroît sur les échantillons dégradés à l'acide. Cette étude constitue une première dans le domaine des détériorations des coulis de ciment d'interface du groupe de mécanique des roches de l'Université de Sherbrooke et elle présente un cheminement unique via un processus de construction des éprouvettes ainsi que par le fonctionnement du montage d'écoulement.

Mots clés : Dégradation, coulis de ciment, joint rocheux, fondation de barrage, cisaillement

Table des matières

1. Introduction	1
1.1. Mise en contexte et problématique.....	1
1.2. Objectifs du projet de recherche.....	6
1.3. Organisation du mémoire	8
2. Notions générales	9
2.1. Fondations rocheuses	9
2.2. Coulis d'injection cimentaire	11
2.3. Cisaillement.....	14
2.4. Critères de ruptures	17
2.5. Caractérisation de la rugosité d'interface.....	28
3. Dégradation d'interface.....	32
3.1. Contextualisation.....	32
3.2. Dégradation d'interface.....	33
3.3. Conclusion.....	38
4. Matériaux et méthodologie expérimentale.....	40
4.1. Programme expérimental	41
4.2. Paramètres, instrumentation et conditions au laboratoire.....	42
4.3. Dimensionnement et fabrication expérimentaux.....	45
4.4. Évaluation des propriétés des matériaux.....	53
5. Résultats et interprétations	63
5.1. Analyse au MEB	63
5.2. Analyse par ICP	71
5.3. Analyse par DRX	73
5.4. La reproductibilité des éprouvettes	74
5.5. Rugosité d'interface	82
5.6. Résistance au cisaillement.....	92
5.7. Enveloppe de rupture selon Mohr-Coulomb.....	103
6. Discussion et recommandations	107
6.1. Résultats obtenus et recommandations.....	107
6.2. Dégradation par écoulement et recommandations	110

6.3. Résumé des recommandations	113
7. Conclusion.....	114
8. Références	116
ANNEXE A – Plan de conception	A1
ANNEXE B – Tableaux des données.....	B1
B.1 – Suivi des montages de dégradation.....	B1
B.2 – Variation de la masse.....	B6
B.3 – Résistance à la compression	B9
B.4 – ICP des échantillons aqueux.....	B13
ANNEXE C – Figures de résultats	C1
C.1 Résultats des directs cisaillement des éprouvettes mortier-coulis	C1
C.2 Résultats des directs cisaillement des éprouvettes roc-coulis.....	C14

Liste des figures

Figure 1.1 – Schéma des composantes primaires et des forces en jeu sur un barrage-poids	2
Figure 1.2 – Schéma des différents joints et de la variation du bassin d'un barrage.....	3
Figure 1.3 – Hypothèse initiale quant aux décollements des joints d’interfaces	5
Figure 2.1 – Localisation des barrages les plus importants du Québec à travers les provinces géologiques.....	9
Figure 2.2 – Les contraintes en jeu lors de la genèse d'un glacier (modifié selon [21])	10
Figure 2.3 – Schématisation des joints de décompression d’un massif rocheux	11
Figure 2.4 – Profilage d’appuis pour un barrage	13
Figure 2.5 – Schématisation des contraintes en jeu sur un plan de discontinuité	15
Figure 2.6 – Courbe de la résistance au cisaillement en fonction du déplacement	16
Figure 2.7 – Enveloppe de rupture du critère linéaire de Mohr-Coulomb.....	17
Figure 2.8 – Critère de Mohr-Coulomb.....	19
Figure 2.9 – Influence de l’angle du plan cisailé sur l’enveloppe de rupture [12]	20
Figure 2.10 – Enveloppe de rupture du critère bilinéaire de Patton-Coulomb	22
Figure 2.11 – Profils de rugosité et JRC équivalent [39].....	26
Figure 2.12 – Représentation de la signification du paramètre Z2 [41]	29
Figure 2.13 – Représentation de la signification du paramètre Z3 [41]	29
Figure 2.14 – Représentation de la signification du paramètre Z4 [41]	30
Figure 2.15 – Représentation de la signification du paramètre R _L [41].....	30
Figure 4.1 – Programme expérimental	41
Figure 4.2 – Prototypage d’échantillons final	47
Figure 4.4 – Échantillon mortier-coulis avant d’être inséré dans le boîtier de dégradation	48
Figure 4.5 – Un échantillon dans son boîtier de dégradation	50
Figure 4.6 – Montage de dégradation conceptuel.....	51
Figure 4.7 – Montage de dégradation réel.....	52
Figure 4.8 – Résultats de compression selon ASTM C109-13.....	55
Figure 4.9 – Profilomètre laser Kréon© Zéphyr 25 [31].....	57
Figure 4.10 – Profil sortant du programme Matlab	58
Figure 4.11 – Montage de cisaillement selon ASTM D5607-02 [60]	59
Figure 4.12 – Résultats de résistance lors d’essais de cisaillement sur un témoin	60
Figure 4.13 – Résultats de dilataance lors d’essais de cisaillement sur un témoin.....	60
Figure 5.1 – Surface d’un joint cimentaire analysé au MEB.....	63
Figure 5.2 – Composition chimique de la surface et du dépôt analysé.....	64
Figure 5.3 – Interface de coulis cimentaire non dégradé.....	65
Figure 5.4 – Évolution de la dégradation d’interface de coulis au MEB pour un écoulement neutre	66
Figure 5.5 – Évolution de la dégradation d’interface de coulis au MEB pour un écoulement acide	67
Figure 5.6 – Évolution de la dégradation d’interface de mortier au MEB pour un écoulement neutre et acide	68
Figure 5.7 – Ettringite primaire observée sur l’interface de mortier cimentaire.....	69
Figure 5.8 – Évolution de la dégradation d’interface de roc au MEB pour un écoulement neutre et acide.....	70
Figure 5.9 - La concentration de silice en ppm dans la solution selon le temps de dégradation	71
Figure 5.10 – DRX effectuée sur un dépôt de surface d’une éprouvette dégradé à l’acide	73
Figure 5.11 – Variation de la masse des surfaces de coulis de ciment pour une dégradation acide de 28 jours	75
Figure 5.12 – Variation de la masse des surfaces de mortier pour une dégradation acide de 28 jours	75
Figure 5.13 – Variation des coefficients de rugosité (JRC) de coulis (dégradation de 28 jours).....	77
Figure 5.14 – Variation des coefficients de rugosité (JRC) mortier (dégradation de 28 jours)	77
Figure 5.15 – Résistance au cisaillement des éprouvettes ayant été dégradées en solution acide durant 28 jours	79
Figure 5.16 – Résultats de la dilataance des éprouvettes ayant été dégradées en solution acide durant 28 jours.....	80
Figure 5.17 – Enveloppes de rupture des résistances résiduelles (éprouvettes de reproductibilité)	81
Figure 5.18 – Évolution des coefficients de rugosité des interfaces de coulis pour une dégradation neutre	84

Figure 5.19 – Évolution des coefficients de rugosité des interfaces de coulis pour une dégradation acide.....	85
Figure 5.20 – Évolution des coefficients de rugosité des interfaces de mortier pour une dégradation neutre	88
Figure 5.21 – Évolution des coefficients de rugosité des interfaces de mortier pour une dégradation acide	89
Figure 5.22 – Évolution des coefficients de rugosité des interfaces de roc pour une dégradation neutre	90
Figure 5.23 – Évolution des coefficients de rugosité des interfaces de roc pour une dégradation acide	91
Figure 5.24 – Résistance au cisaillement d'un échantillon non dégradé	92
Figure 5.25 – Résistance au cisaillement d'un échantillon dégradé durant 56 jours avec de l'eau	93
Figure 5.26 – Résistance au cisaillement d'un échantillon dégradé durant 56 jours avec de l'acide	94
Figure 5.27 – Dilatance d'un échantillon non dégradé.....	95
Figure 5.28 – Dilatance d'un échantillon dégradé durant 56 jours avec de l'eau	96
Figure 5.29 – Dilatance d'un échantillon dégradé durant 56 jours avec de l'acide	96
Figure 5.30 – Résistance au cisaillement d'un échantillon non dégradé	97
Figure 5.31 – Résistance au cisaillement d'un échantillon dégradé durant 56 jours avec de l'eau	98
Figure 5.32 – Résistance au cisaillement d'un échantillon dégradé durant 56 jours avec de l'acide	99
Figure 5.33 – Dilatance d'un échantillon non dégradé.....	100
Figure 5.34 – Dilatance d'un échantillon dégradé durant 56 jours avec de l'eau	101
Figure 5.35 – Dilatance d'un échantillon dégradé durant 56 jours avec de l'acide	101
Figure 5.36 – Enveloppe de rupture selon M-C pour des échantillons dégradés à l'eau durant 0 à 56 jours	103
Figure 5.37 – Enveloppe de rupture selon M-C pour des échantillons dégradés à l'acide durant 0 à 56 jours	104
Figure 5.38 – Enveloppe de rupture selon M-C pour des échantillons dégradés à l'eau durant 0 à 56 jours	105
Figure 5.39 – Enveloppe de rupture selon M-C pour des échantillons dégradés à l'acide durant 0 à 56 jours	106
Figure A.1 – Dimensions du boîtier de dégradation.....	A1
Figure C.1 – Résistance au cisaillement d'un échantillon mortier-coulis non dégradé.....	C1
Figure C.2 – Dilatance d'un échantillon mortier-coulis non dégradé.....	C1
Figure C.3 – Résistance au cisaillement d'un échantillon mortier-coulis non dégradé	C2
Figure C.4 – Dilatance d'un échantillon mortier-coulis non dégradé.....	C2
Figure C.5 – Résistance au cisaillement d'un échantillon mortier-coulis non dégradé	C3
Figure C.6 – Dilatance d'un échantillon mortier-coulis non dégradé.....	C3
Figure C.7 – Résistance au cisaillement d'un échantillon mortier-coulis dégradé durant 14 jours avec de l'eau .	C4
Figure C.8 – Dilatance d'un échantillon mortier-coulis dégradé durant 14 jours avec de l'eau.....	C4
Figure C.9 – Résistance au cisaillement d'un échantillon mortier-coulis dégradé durant 28 jours avec de l'eau .	C5
Figure C.10 – Dilatance d'un échantillon mortier-coulis dégradé durant 28 jours avec de l'eau	C5
Figure C.11 – Résistance au cisaillement d'un échantillon mortier-coulis dégradé durant 42 jours avec de l'eau	C6
Figure C.12 – Dilatance d'un échantillon mortier-coulis dégradé durant 42 jours avec de l'eau	C6
Figure C.13 – Résistance au cisaillement d'un échantillon mortier-coulis dégradé durant 56 jours avec de l'eau	C7
Figure C.14 – Dilatance d'un échantillon dégradé mortier-coulis durant 56 jours avec de l'eau.....	C7
Figure C.15 – Résistance au cisaillement d'un échantillon mortier-coulis dégradé durant 56 jours avec de l'eau	C8
Figure C.16 – Dilatance d'un échantillon mortier-coulis dégradé durant 56 jours avec de l'eau.....	C8
Figure C.17 – Résistance au cisaillement mortier-coulis dégradé durant 14 jours avec de l'acide	C9
Figure C.18 – Dilatance d'un échantillon mortier-coulis dégradé durant 14 jours avec de l'acide.....	C9
Figure C.19 – Résistance au cisaillement mortier-coulis dégradé durant 28 jours avec de l'acide	C10
Figure C.20 – Dilatance d'un échantillon mortier-coulis dégradé durant 28 jours avec de l'acide	C10
Figure C.21 – Résistance au cisaillement mortier-coulis dégradé durant 42 jours avec de l'acide	C11
Figure C.22 – Dilatance d'un échantillon mortier-coulis dégradé durant 42 jours avec de l'acide	C11
Figure C.23 – Résistance au cisaillement mortier-coulis dégradé durant 56 jours avec de l'acide	C12
Figure C.24 – Dilatance d'un échantillon mortier-coulis dégradé durant 56 jours avec de l'acide	C12
Figure C.25 – Résistance au cisaillement mortier-coulis dégradé durant 56 jours avec de l'acide	C13
Figure C.26 – Dilatance d'un échantillon mortier-coulis dégradé durant 56 jours avec de l'acide.....	C13
Figure C.27 – Résistance au cisaillement d'un échantillon roc-coulis non dégradé.....	C14
Figure C.28 – Dilatance d'un échantillon roc-coulis non dégradé	C14
Figure C.29 – Résistance au cisaillement d'un échantillon roc-coulis non dégradé.....	C15
Figure C.30 – Dilatance d'un échantillon roc-coulis non dégradé	C15

Figure C.31 – Résistance au cisaillement d'un échantillon roc-coulis non dégradé.....	C16
Figure C.32 – Dilatance d'un échantillon roc-coulis non dégradé	C16
Figure C.33 – Résistance au cisaillement d'un échantillon roc-coulis dégradé durant 14 jours avec de l'eau....	C17
Figure C.34 – Dilatance d'un échantillon roc-coulis dégradé durant 14 jours avec de l'eau	C17
Figure C.35 – Résistance au cisaillement d'un échantillon roc-coulis dégradé durant 28 jours avec de l'eau....	C18
Figure C.36 – Dilatance d'un échantillon roc-coulis dégradé durant 28 jours avec de l'eau	C18
Figure C.37 – Résistance au cisaillement d'un échantillon roc-coulis dégradé durant 42 jours avec de l'eau....	C19
Figure C.38 – Dilatance d'un échantillon roc-coulis dégradé durant 42 jours avec de l'eau	C19
Figure C.39 – Résistance au cisaillement d'un échantillon roc-coulis dégradé durant 56 jours avec de l'eau....	C20
Figure C.40 – Dilatance d'un échantillon roc-coulis dégradé durant 56 jours avec de l'eau	C20
Figure C.41 – Résistance au cisaillement d'un échantillon roc-coulis dégradé durant 56 jours avec de l'eau....	C21
Figure C.42 – Dilatance d'un échantillon roc-coulis dégradé durant 56 jours avec de l'eau	C21
Figure C.43 – Résistance au cisaillement d'un échantillon roc-coulis dégradé durant 14 jours avec de l'acide.	C22
Figure C.44 – Dilatance d'un échantillon roc-coulis dégradé durant 14 jours avec de l'acide.....	C22
Figure C.45 – Résistance au cisaillement d'un échantillon roc-coulis dégradé durant 28 jours avec de l'acide.	C23
Figure C.46 – Dilatance d'un échantillon roc-coulis dégradé durant 28 jours avec de l'acide.....	C23
Figure C.47 – Résistance au cisaillement d'un échantillon roc-coulis dégradé durant 42 jours avec de l'acide.	C24
Figure C.48 – Dilatance d'un échantillon roc-coulis dégradé durant 42 jours avec de l'acide.....	C24
Figure C.49 – Résistance au cisaillement d'un échantillon roc-coulis dégradé durant 56 jours avec de l'acide.	C25
Figure C.50 – Dilatance d'un échantillon roc-coulis dégradé durant 56 jours avec de l'acide.....	C25
Figure C.51 – Résistance au cisaillement d'un échantillon roc-coulis dégradé durant 56 jours avec de l'acide.	C26
Figure C.52 – Dilatance d'un échantillon roc-coulis dégradé durant 56 jours avec de l'acide.....	C26

Liste des Tableaux

Tableau 2.1 – Facteurs influençant la dégradation du coulis cimentaire	12
Tableau 4.1 – Quantité des différents éléments pour produire 10 litres de solution acide.....	53
Tableau 4.2 – Paramètres statistiques d'une surface calculés à l'aide de Matlab	58
Tableau 5.1 – Coefficients de rugosité initiaux pour les surfaces de coulis.....	83
Tableau 5.2 – Exposition de la variation du JRC dégradé pour des interfaces brossées ou non	86
Tableau 5.3 – Coefficients de rugosité initiaux pour les surfaces de mortier	87
Tableau 5.4 – Coefficients de rugosité initiaux pour les surfaces de roc	89
Tableau B.1 – Suivi des montages d'écoulement série 1	B1
Tableau B.2 – Suivi des montages d'écoulement série 2	B2
Tableau B.3 – Suivi des montages d'écoulement série 3	B3
Tableau B.4 – Suivi des montages d'écoulement série 4	B4
Tableau B.5 – Suivi des montages d'écoulement série 5	B5
Tableau B.6 – Variation de masse durant la dégradation pour les séries 1 et 2	B6
Tableau B.7 – Variation de masse durant la dégradation pour les séries 3 et 4	B7
Tableau B.8 – Variation de masse durant la dégradation pour la série 5	B8
Tableau B.9 – Résistance à la compression des matériaux cimentaires de la série 1	B9
Tableau B.10 – Résistance à la compression des matériaux cimentaires de la série 2.....	B10
Tableau B.11 – Résistance à la compression des matériaux cimentaires de la série 3.....	B11
Tableau B.12 – Résistance à la compression des matériaux cimentaires de la série 4 et 5.....	B12
Tableau B.13 – ICP de la solution acide pour la série 2	B13
Tableau B.14 – ICP de la solution acide pour la série 4	B14

1. Introduction

1.1. Mise en contexte et problématique

Au Québec, il existe plusieurs milliers d'ouvrages de rétention d'eau dont le dixième est majoritairement composé des ouvrages de grande envergure tels que les barrages-poids [1]. Ces constructions sont contrôlées par la société d'État Hydro-Québec qui utilise ses actifs pour produire de l'électricité. En plus d'être considérée comme une énergie verte, l'hydroélectricité est l'une des principales sources de revenus économiques pour la province francophone et elle constitue 97% de la production électrique totale du territoire [2]. La production abondante d'électricité permet la revente d'énergie au nord-est des États-Unis en plus d'accueillir des secteurs de production énergivore telle que les alumineries.

En 1996, de fortes pluies survenues dans la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean¹ ont entraîné l'inondation de plusieurs zones au long de la rivière Chicoutimi, nécessitant l'évacuation d'environ 6000 riverains. Les conclusions de la commission d'enquête Nicolet [3] ont révélé que certains barrages présentaient des dysfonctionnements au niveau des vannes des évacuateurs de crues, contribuant au débordement des bassins. À cette époque, les barrages dataient en moyenne de 50 ans et aucun programme d'évaluation des structures rigoureux n'avait été mis en place. Les recommandations faisant suite à cette commission ont fondé la loi sur la sécurité des barrages [4]. Cette dernière stipule que les ouvrages de retenues des eaux du Québec doivent être soumis à un encadrement au niveau des méthodes de constructions. Elle oblige également les propriétaires d'ouvrages à effectuer un suivi rigoureux de l'évolution de leur structure, et ce tout au long de leur vie utile. Les règlements associés à cette loi suggèrent également un système de classification des ouvrages par rapport aux pertes humaines et matérielles associées à une éventuelle rupture. En réponse à ces changements législatifs, Hydro-Québec a entrepris d'analyser ses ouvrages, composés majoritairement de barrages-poids en béton. Cette appellation réfère à leur caractéristique principale de résistance face aux modes de ruptures auxquels ils sont soumis.

¹ Région administrative du Québec situé au nord de la capitale provinciale et accueillant plusieurs barrages d'importances.

Ces modes sont essentiellement le glissement et le renversement de l'ouvrage (figure 1.1). Bien qu'elles ne soient pas investiguées dans le cadre de cette étude, le dimensionnement des barrages québécois nécessite également de prendre en considération les forces sismiques qui peuvent être critiques [5]. Le glissement d'un barrage survient à travers un joint lorsque les forces engendrées par les poussées hydrostatiques dépassent les forces stabilisatrices ou encore la résistance au cisaillement d'un joint [6].

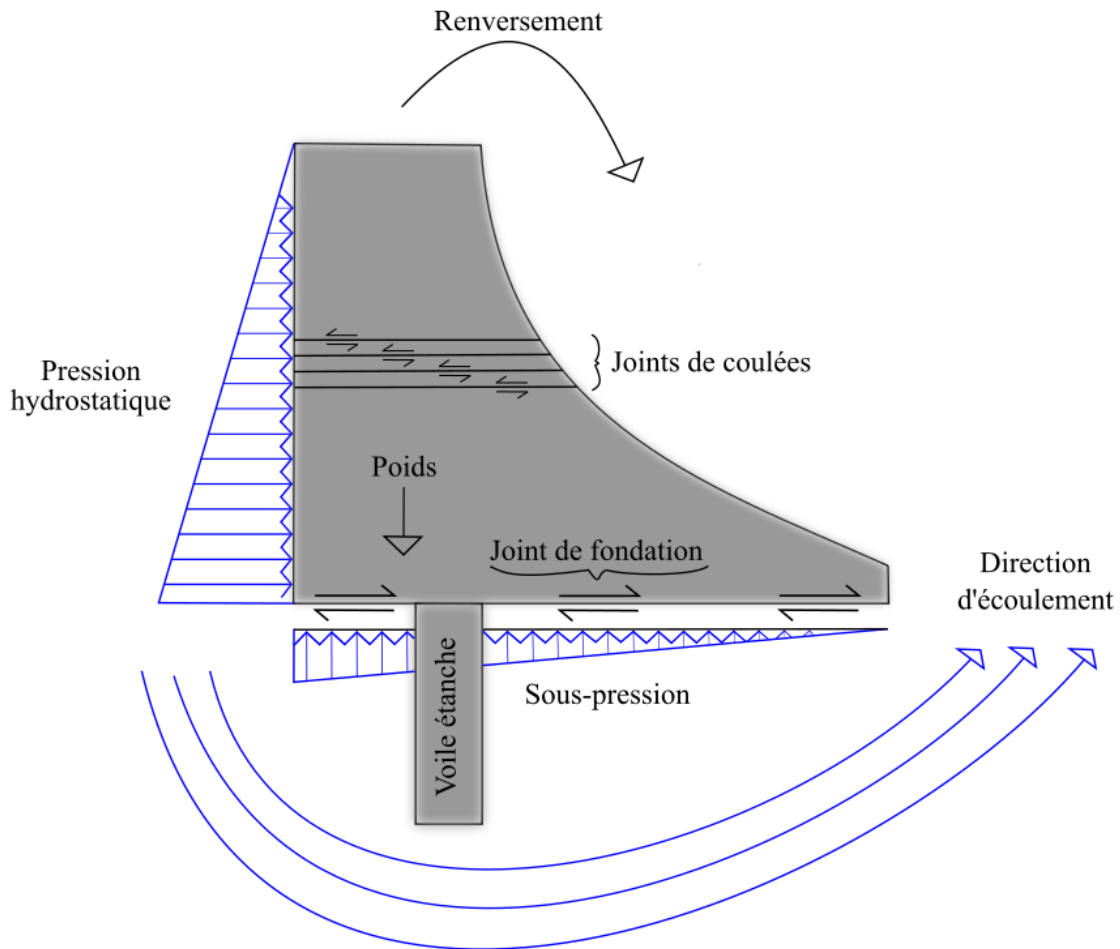


Figure 1.1 – Schéma des composantes primaires et des forces en jeu sur un barrage-poids

Les principaux types de discontinuités soumis aux forces de cisaillement sont les joints roc-béton, présentant la liaison entre le barrage et le socle rocheux ainsi que les joints béton, joints de coulés présents sur l'intégralité des structures² ou des fissures traversant l'ouvrage (figure

² Afin d'éviter des gradients thermiques trop grands lors de la cure du béton qui pourrait être nuisibles à la qualité du matériau, les barrages-poids sont construits par palier de 1.5 à 3 mètres créant ainsi des joints de coulés.

1.2). Généralement, ces dernières sont réparées à l'aide d'injection cimentaire afin d'éviter toute dégradation prématurée par rapport aux espérances de conception, des joints.

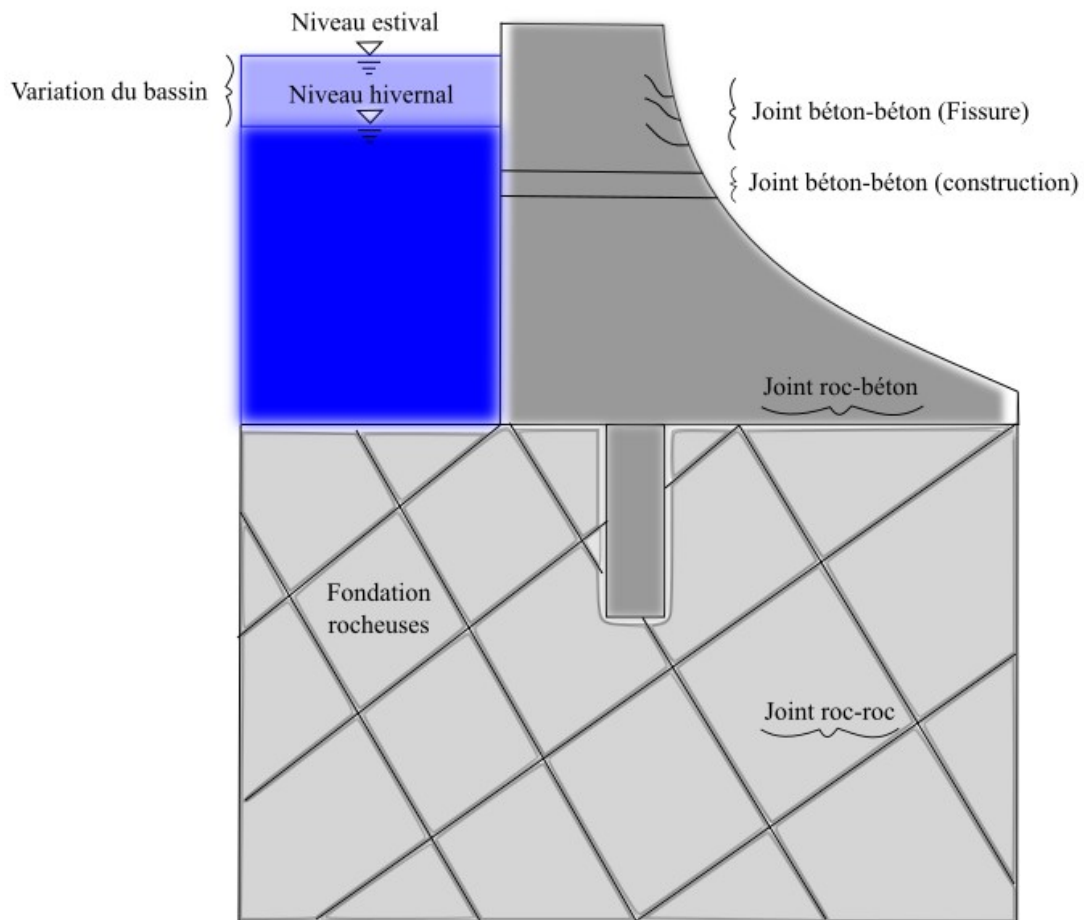


Figure 1.2 – Schéma des différents joints et de la variation du bassin d'un barrage

En ce qui a trait au renversement de la structure, le poids du barrage permet d'assurer la stabilité de la structure en générant une force de friction suffisante à sa base pour compenser la poussée hydrostatique engendrée par le bassin sur la partie amont de l'ouvrage. Cependant, cette résistance au renversement est également diminuée par les sous-pressions ou pressions internes causées par la présence d'eau dans les fondations. Ces pressions, situées à la base du barrage sont occasionnées par l'infiltration d'eau dans les fondations rocheuses qui circule à travers les joints. Afin d'éviter des sous-pressions trop importantes, les fondations rocheuses sont traitées³ au coulis de ciment et un voile étanche, imitant une palplanche est injectée sous le barrage [7,8].

³ Généralement, les trous et les fissures présents dans les socles rocheux sont remplis avec du coulis de ciment. Le processus a pour objectif d'étanchéifier les fondations de rétention d'eau.

Il a été relevé que quelques barrages de la province se retrouvent avec des problèmes de fissurations sur les faces exposées aux intempéries tels que les rayons de soleil et les cycles de gel-dégel. De plus, une plus grande perméabilité des fondations rocheuses s'expliquant par le cheminement de l'eau au sein réseau de discontinuités a également pu être recensée. Cette dernière peut devenir plus importante lorsque les injections commencent à se dégrader avec l'âge ou lorsque la qualité du voile d'injection n'est pas satisfaisante. L'infiltration d'eau dans les fissures ou dans les fondations peut donc engendrer le lessivage des injections de coulis [9].

C'est le cas pour l'un des barrages les plus impressionnants du Québec, le barrage Daniel Johnson. En effet, la structure à voûtes multiples est affectée par des fissures, ce qui entraîne une accélération de la dégradation marquée et continue où l'eau peut circuler [9]. Les réparations de ces fissures effectuées au cours de la première décennie du 21^e siècle ont été injectées à l'aide de coulis de ciment microfin dont les propriétés ainsi que les avantages ont été déterminés en laboratoire par l'Institut de recherche d'Hydro-Québec [10]. Ces études initiées par Hydro-Québec ont également servi d'appui à l'équipe de Pierre Léger de l'École Polytechnique de Montréal pour la détermination de l'effet structural des coulis par rapport aux forces de traction [11]. Cependant, les réparations sont affectées par la détérioration des injections de coulis et elles semblent même accélérer par leur environnement, subissant ainsi un vieillissement « prématuré » par rapport aux espérances de conception.

La problématique initiale de ce projet est liée à la disponibilité des informations quant au phénomène de vieillissement du coulis cimentaire des ouvrages hydroélectriques. La principale raison de ce manque de données par rapport au phénomène est que le domaine d'action du vieillissement demeure mal défini et il constitue un sujet peu exploré dans le domaine hydroélectrique, que ce soit pour le barrage Daniel-Johnson ou simplement dans la littérature en général. Selon les informations en lien avec le vieillissement, des injections cimentaires accentueraient les détériorations causées par l'écoulement dans les discontinuités, par les chocs thermiques (rayonnement) ou par les cycles thermiques comme le gel-dégel, sur les faces extérieures des barrages.

Différents groupes de recherches ont travaillé sur la définition de paramètres pouvant affecter la résistance des interfaces des barrages face aux forces de cisaillements auxquels ils sont soumis [12–14]. Ces paramètres (la morphologie et la rugosité entre les discontinuités, la présence ou non de cohésion et la présence d'eau ou de fines particules entre les interfaces) sont considérés à l'intérieur de modèles qui tentent de décrire le comportement mécanique des ouvrages de retenue des eaux. Des critères découlant de celui de Mohr-Coulomb ont par la suite fait leur apparition, cependant aucun d'entre eux ne prend en considérant la dégradation d'interface.

Cette étude est la première dans le domaine des détériorations des coulis de ciment d'interface du groupe de mécanique des roches de l'Université de Sherbrooke et elle présente un cheminement unique via un processus de construction des éprouvettes ainsi que par le fonctionnement du montage d'écoulement. Cette étude vise à répondre au questionnement suivant : quels sont les principaux facteurs qui constituent les effets du vieillissement et comment ces détériorations affectent les propriétés mécaniques des joints?

L'hypothèse initiale du projet est que le joint entre le coulis de ciment et le matériau qu'il répare ou étanchéifie (béton ou roc) se situe au plan le plus faible, c'est-à-dire à la délimitation des deux matériaux. Le processus de dégradation survient une fois que ce joint existe et permet la circulation de fluides (figure 1.2). Avec le temps, cet espacement pourrait être causé entre autres par les cycles hydrostatiques des bassins de rétention (figure 1.2).

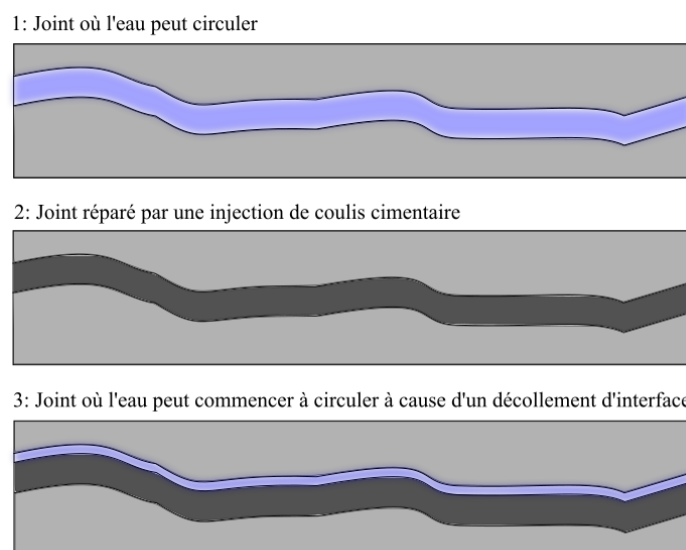


Figure 1.3 – Hypothèse initiale quant aux décollements des joints d'interfaces

1.2. Objectifs du projet de recherche

L'objectif principal de ce projet est de définir le phénomène de vieillissement afin d'analyser de façon quantitative ses effets sur les injections de coulis de ciment et par ce fait même, du vieillissement des fondations ainsi que des fissures qui peuvent survenir sur les parements aval des barrages.

Pour ce faire, plusieurs sous-objectifs ont été définis afin de répondre le plus justement possible à cet objectif principal. Ces sous-objectifs sont:

- a) Déterminer les facteurs de détérioration qui peuvent être associés au phénomène de vieillissement des barrages au Québec. Un survol de la littérature indique que les facteurs de dégradation principaux des injections de coulis cimentaire sont les cycles thermaux (gel-dégel, fort rayonnement estival) ainsi que l'érosion mécanique et la dissolution chimique résultant de l'écoulement de l'eau. Ce sous-objectif consiste à identifier les facteurs les plus dommageables et surtout, les plus récurrents. Les chapitres 2 et 3 de ce document, effectuant un retour sur les connaissances de base et l'état de l'art actuel, répondent à ce sous-objectif.
- b) Développer un modèle d'éprouvettes pouvant être soumises à un écoulement constant et présentant une rugosité similaire aux joints rocheux et aux fissures dans le béton. Ce sous-objectif constitue la portion nécessitant le plus de créativité du projet. Le but étant de présenter un prototype final qui s'harmonise avec les conditions établies par le sous-objectif c).
- c) Développer une méthode expérimentale en laboratoire pouvant représenter les conditions d'écoulement des fondations des barrages. Ce sous-objectif consiste à créer une dégradation en laboratoire équivalent à celles des interfaces des barrages québécois. De cette façon, il sera possible d'analyser les propriétés mécaniques et de quantifier l'état global des échantillons sans endommager les ouvrages, ce qui n'est pas envisageable. Pour ce faire, le processus d'expérimentation devra s'effectuer en accéléré et il sera également reproductible.

d) Définir une méthode d'essais après dégradation afin de qualifier et de quantifier le vieillissement après l'expérimentation. Ce sous-objectif suggère l'établissement d'une méthodologie de travail ayant pour objectif de recueillir les données et résultats les plus pertinents tout au long du processus de dégradation. L'objectif est de pouvoir qualifier et quantifier l'évolution de la dégradation à travers le temps afin d'obtenir suffisamment de résultats pour appuyer le quatrième sous-objectif.

La finalité du projet pourra premièrement établir la validité du cadre d'essais entrepris, à savoir si les méthodes de fabrication des échantillons et du montage résultent à des données cohérentes. Étant donné que le domaine d'étude est vaste et plus ou moins bien défini, ce projet peut établir les bases d'une meilleure compréhension du phénomène de vieillissement des coulis d'injections qui pourrait engendrer le développement d'études similaires. Sur une base plus pratique, le projet vise à reproduire une injection de coulis détérioration de façon non destructive afin de mieux comprendre le phénomène vieillissement. Ultimement, ces notions seront considérées plus efficacement lors du dimensionnement des ouvrages ou lors de processus de réhabilitation. C'est donc dans le cadre d'un partenariat entre Hydro-Québec et l'Université de Sherbrooke que l'investigation des paramètres en jeu a été réalisée.

1.3. Organisation du mémoire

L'organisation de ce mémoire se divise en six chapitres qui sont :

Chapitre 2 : Notions théoriques. Ce chapitre intègre des concepts de base en ce qui a trait aux injections de coulis cimentaire en plus d'ajouter quelques notions de dégradation de ce matériau. Il inclut également l'explication de différents critères de ruptures au cisaillement ainsi que leurs paramètres d'entrée.

Chapitre 3 : La dégradation d'interface. Cette section identifie les principaux facteurs de dégradation causant le vieillissement. Elle établit également l'influence des dégradations sur la résistance au cisaillement des joints injectés justifiant ainsi, l'utilisation des critères de ruptures pour quantifier les dégradations.

Chapitre 4 : Matériau et méthodologie expérimentale. Ce chapitre intègre le programme expérimental, c'est-à-dire : Les matériaux choisis, la conception des échantillons et du montage de dégradation, la confection de ces derniers, le choix des différentes séries de dégradation, les données recueillis durant le processus de vieillissement ainsi que les essais finaux sur les interfaces menant aux résultats.

Chapitre 5 : Résultats et interprétations : Les résultats obtenus sur les échantillons en lien avec les différents essais ainsi que leur analyse sommaire.

Chapitre 6 : Discussion et recommandations : Un résumé des résultats, les aspects non traités ainsi que les recommandations en lien avec cette étude seront présentés dans ce chapitre.

Chapitre 7 : Conclusions : Les conclusions générales du projet, les retombées ainsi que les suites du projet y sont exposées.

2. Notions générales

2.1. Fondations rocheuses

Les barrages sont des structures qui sont généralement construites à l'exutoire d'un bassin versant, c'est-à-dire au point le plus bas, la rivière. Ces ouvrages sont appuyés de chaque côté sur les parois rocheuses d'une vallée (érodée par la rivière et le passage des glaciers) où les fondations sont également constituées d'un socle rocheux de même composition. Au Québec, le Bouclier canadien compose 90% de la géologie. Ce dernier intègre les trois plus grandes provinces géologiques du territoire soit, la Province de Grenville, du Supérieur et de Churchill [15]. Tout comme la figure 2.1 l'expose, c'est dans les provinces de Grenville et du Supérieur qu'ont été construits les barrages à réservoir les plus productifs d'Hydro-Québec [16].

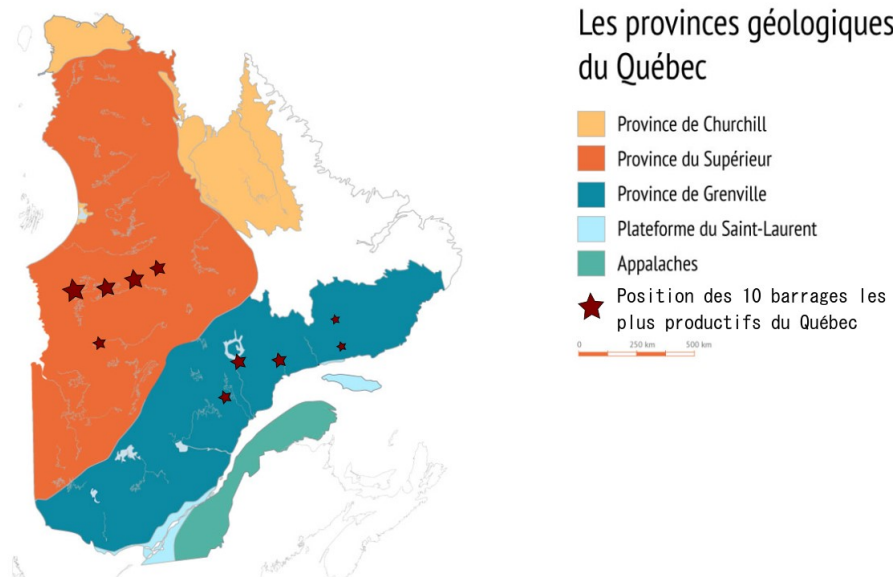


Figure 2.1 – Localisation des barrages les plus importants du Québec à travers les provinces géologiques⁴

Le Bouclier canadien est majoritairement (90% du socle rocheux) composé de roches granitoïdes, para et ortho gneissiques [7], roches minéralogiquement composées de feldspath et de quartz. Cette région a été soumise à de forts taux de métamorphisme justifiant la grande présence de roche foliée tel que le gneiss granitique, le gneiss à biotite, etc. On y retrouve également beaucoup de roche ignée telle que les granites et leurs déclinaisons ex : granodiorites

⁴ <http://objectifnord.telequebec.tv/explorer/liste/sous-sol-du-nord/provinces-geologiques>
<http://www.hydroquebec.com/production/centrale-hydroelectrique.html>

[17]. Suite à ces recherches, il a été décidé que pour cette étude, le granite constituait le matériau de fondation le plus souvent injecté par des coulis pour les ouvrages hydroélectriques d'envergure au Québec.

2.1.1. Propriétés mécaniques des roches les plus récurrentes

Le granite est une roche ignée composée majoritairement de feldspath et de quartz, la présence de minéraux micacés peut également être observée [18]. Pour la suite de l'étude, il est important de comprendre que le granite constitue une roche assez dense (2.7 T/m^3) et qu'il possède d'excellentes propriétés mécaniques, notamment par sa résistance à la compression qui en moyenne, résulte à 200 MPa pour un échantillon non fracturé [19,20]. Qu'elles soient sous forme ignée ou sous forme de gneiss⁵, les granitoïdes possèdent généralement des propriétés mécaniques supérieures à celles des bétons standards [7] et ils sont plus résistants aux intempéries que les matériaux cimentaires. Il s'agit donc d'un type de sol idéal pour y installer de grandes structures tel qu'un barrage hydroélectrique.

2.1.2. Niveau de fracturation et le réseau d'écoulement

Bien qu'ils possèdent de bonnes propriétés mécaniques, les massifs rocheux du Bouclier canadien ont supporté le poids d'immense glacier durant la dernière période de glaciation. Ces gigantesques masses de glaces ont eu pour effets d'exposer et de façonner les massifs rocheux aux intempéries en érodant la roche altérée de surface. La figure 2.2 illustre les forces en jeu lors de la fonte d'un glacier [21].

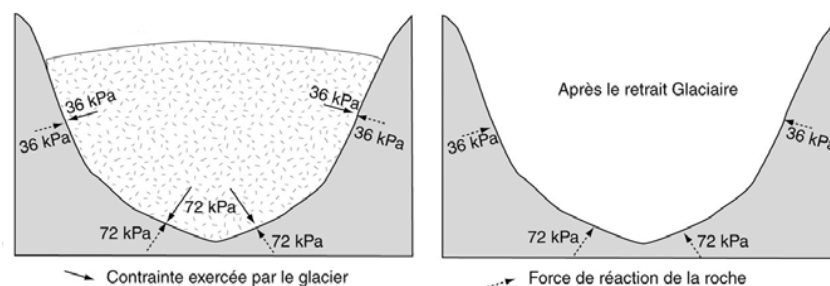


Figure 2.2 – Les contraintes en jeu lors de la genèse d'un glacier (modifié selon [21])

⁵ Lorsque les granites ont été métamorphisés sous forme de gneiss, la roche est foliée et possède des plans de rupture préférentielle. Cette roche est généralement moins résistante mécaniquement.

Le retrait des glaciers a engendré une décompression générale au sein des massifs rocheux, fracturant ainsi le matériau fragile [18]. Ce dernier engendre initialement une contrainte comprimant le massif rocheux jusqu'à un seuil limite. Le massif répond à cette compression (force de décompression) jusqu'à ce qu'il soit repris son volume d'origine. Par conséquent, tout au long du retrait du glacier, le sous-sol rocheux subit des contraintes de traction et il se fracture. Il est important de noter que la résistance à la traction équivaut à environ 10% à celle des contraintes compressives [19,20]. La figure 2.3 expose une schématisation des joints de décompression, qui s'y retrouve sous forme horizontale.

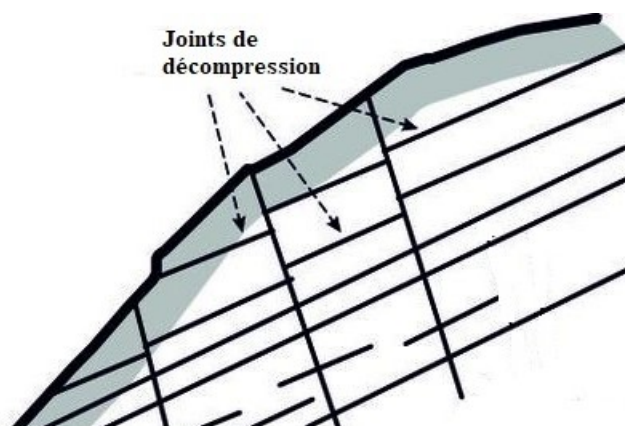


Figure 2.3 – Schématisation des joints de décompression d'un massif rocheux⁶

Cette fracturation crée un réseau de joint préférentiel où l'eau peut y écouler facilement. Tel qu'établi dans le chapitre précédent (figure 1.1) [22], l'eau située dans les fondations rocheuses engendre des sous-pressions proportionnelles au niveau d'un bassin de rétention et elles sont néfastes pour la sécurité des barrages hydroélectriques [23].

2.2. Coulis d'injection cimentaire

Dans le domaine hydroélectrique, plusieurs types de coulis peuvent être employés, notamment les coulis à base de polymères et les coulis cimentaires. Les injections cimentaires sont les plus utilisées au Québec étant donné qu'elles sont facilement maîtrisables et qu'elles sont globalement moins chères. Généralement ce type de coulis est composé d'eau et de ciment Portland ou microfin à un rapport moyen de $E/C = 0,5$. Parfois, pour améliorer la fluidité ou le temps de prise du produit, du superplastifiant ou un accélérateur de prise peuvent être ajoutés à

⁶ https://en.wikipedia.org/wiki/Persistence_%28discontinuity%29

la formule. Bien qu'ils semblent que la durabilité des coulis cimentaire soit moins élevée que celle des coulis chimiques dus aux conditions difficiles apportées par leur milieu d'exposition [10,24,25], l'emploi de ce produit est incontournable pour la sécurité des ouvrages hydriques.

2.2.1. Milieux d'exposition des coulis d'injection

Les coulis cimentaires sont généralement injectés dans deux types de matériaux distincts : le réseau de joint du massif rocheux constituant les fondations, ainsi que les fissures dans le béton de la structure. Les fondations rocheuses sont globalement des milieux très humides où l'eau y circule. La dissolution par l'eau de certains minéraux comme la pyrite peut également entraîner une baisse de pH de l'écoulement augmentant la cinétique de dégradation [26]. Les milieux extérieurs sont également très agressifs et ils diminuent la pérennité des injections cimentaires, notamment par l'environnement qui s'acidifie en absorbant du gaz carbonique (CO₂). De plus, les fortes variations thermiques québécoises engendrent plusieurs cycles de gel-dégel durant l'année. Le tableau 2.1 expose les principaux facteurs de dégradation des injections qui peuvent être présents dans ces milieux en plus de qualifier leur type d'altération soit, chimique ou physique.

Tableau 2.1 – Facteurs influençant la dégradation du coulis cimentaire

<u>Facteurs</u>	<u>Altération chimique</u>	<u>Altération physique</u>
<u>Présence d'eau</u>	Dissolution	Érosion (Vitesse et pression)
<u>CO₂ présent dans l'eau</u>	Carbonatation	-
<u>pH de l'eau</u>	Dissolution plus rapide	-
<u>Présence de sulfates</u>	Gonflement du coulis	-
<u>Présence de chlorures</u>	Possible gonflement	-
<u>Cycle gel-dégel</u>	-	Érosion + éclatement

Ce tableau offre un premier regard sur les principaux types de dégradation que les coulis subissent à travers ces milieux. Cependant, une vision plus précise de leur fonctionnement respectif ainsi qu'une justification des facteurs de dégradation les plus critiques sont présentées sous forme de revue littéraire dans le chapitre suivant. Malgré que les milieux souterrains et

extérieurs soient très dommageables pour les coulis cimentaires, les injections ont toutefois une très grande importance dans le domaine hydroélectrique. La sous-section suivante traite des différentes utilités de ces injections pour leurs milieux respectifs.

2.2.2. L'utilité des injections dans le domaine hydroélectrique

Les coulis d'injections servent majoritairement à protéger les boulons d'ancrages dans les parois rocheuses, à profiler les appuis du barrage, à étanchéifier les joints rocheux ainsi qu'à la réparation des fissures présent sur les ouvrages de rétention des eaux.

Les boulons d'ancrages ont pour objectif de stabiliser les pentes rocheuses en ancrant les blocs de roc qui se sont détachés de la paroi rocheuse. Ces derniers sont exclus du massif par la présence d'un joint et ils peuvent être considérés à risque selon le pendage de la discontinuité. Le coulis cimentaire a comme objectif premier de protéger la tige qui est généralement métallique (acier). Il agit donc comme un agent protecteur empêchant la circulation d'eau qui accélérerait le processus de corrosion des boulons. Cet agent peut également, dans certains cas⁷, augmenter le frottement entre la paroi rocheuse et le boulon. En ce qui a trait au profilage des appuis et des fondations, le coulis cimentaire permet de remplir des cavités et de créer des zones de contact continues. Le tout doit respecter les angles maximaux permis. La figure 2.4 offre un résumé visuel d'un profilage d'appuis standard [8].

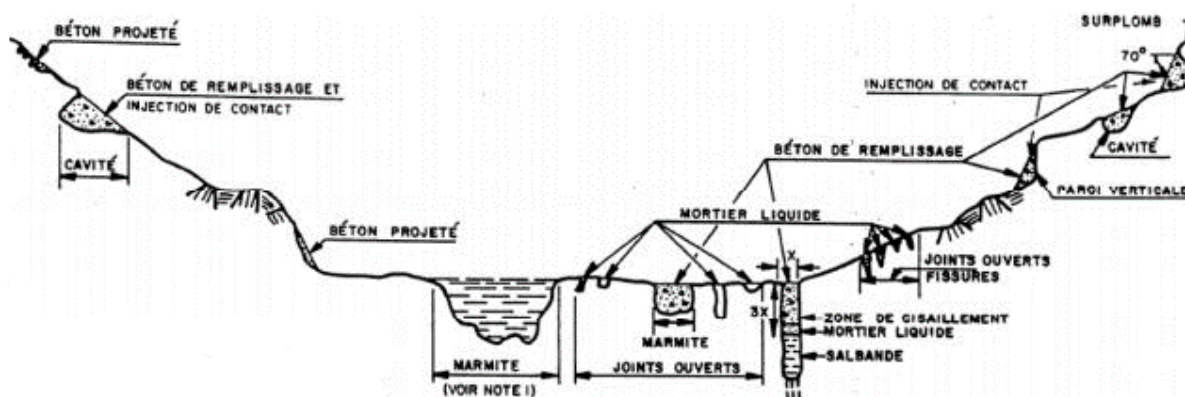


Figure 2.4 – Profilage d'appuis pour un barrage

⁷ Certains types de boulons nécessitent un très bon contact avec la paroi pour être efficaces.

Afin d'éviter une trop grande circulation d'eau à travers les massifs rocheux, les fondations et les appuis (la vallée) sont traités à l'aide de coulis d'injection cimentaire. Les trous de surface sont refermés, les pentes sont adoucies et un voile d'injection est administré aux fondations. Ce voile a pour objectif de dissiper les charges d'eau à travers le massif rocheux en obligeant l'écoulement à le contourner. Il est donc plus que nécessaire que ce dernier soit en bon état.

L'étanchéification des joints rocheux correspond aux plus gros volumes de coulis cimentaires utilisés pour ce type d'ouvrage. Ils ne représentent toutefois pas la totalité des joints problématiques (ou l'eau peut y circuler). Effectivement, il est possible qu'une dégradation des ouvrages au niveau des faces exposées aux intempéries survienne avec le temps. Cette détérioration qui se fait sous forme de fissuration (fissures plongeantes), constitue un chemin préférentiel pour l'écoulement de l'eau à travers l'ouvrage. À noter que des défauts de conception structurale peuvent également être à l'origine de telles fissures [9]. Il est donc essentiel de colmater ces discontinuités marquées dans l'ouvrage à l'aide de coulis d'injection. Il est important de considérer que les joints de coulées peuvent également constituer des plans préférentiels aux fissures ou l'écoulement d'eau peut survenir.

2.3. Cisaillement

Tel qu'introduit dans le premier chapitre de cette étude, le dimensionnement d'un barrage-poids repose sur des critères de sécurité liés aux plans de discontinuités. Ces joints représentent le contact partiel entre des matériaux différents (roc-béton) ou ils sont tout simplement présents à l'intérieur du même matériel en conséquence à des techniques de construction, les joints de coulées (béton-béton). Par conséquent, pour que la structure soit sécuritaire, ces joints doivent résister à la contrainte de cisaillement engendrée par les poussées hydrostatiques du bassin de rétention. La contrainte de cisaillement est une contrainte mécanique qui s'applique de façon tangentielle (parallèle) à un plan d'un matériau ou à un fluide qu'elle cisaille. La formule 2.1 exprime la contrainte (τ) de cisaillement où (F) correspond à la force tangentielle appliquée sur une surface (A) :

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

Par opposition à cette contrainte, la contrainte normale agit perpendiculairement au plan cisailé. Cette dernière vient confiner les deux corps⁸ se séparant la discontinuité, en augmentant le frottement (composant de la résistance au cisaillement d'un plan). Dans le cas d'un barrage-poids, la contrainte normale est engendrée par la masse de béton au-dessus de la discontinuité. Il est important de considérer que l'étude n'intègre que deux (2) dimensions de la contrainte de cisaillement. La figure 2.5 schématise un corps quelconque soumis à une contrainte de cisaillement et à une contrainte normale.

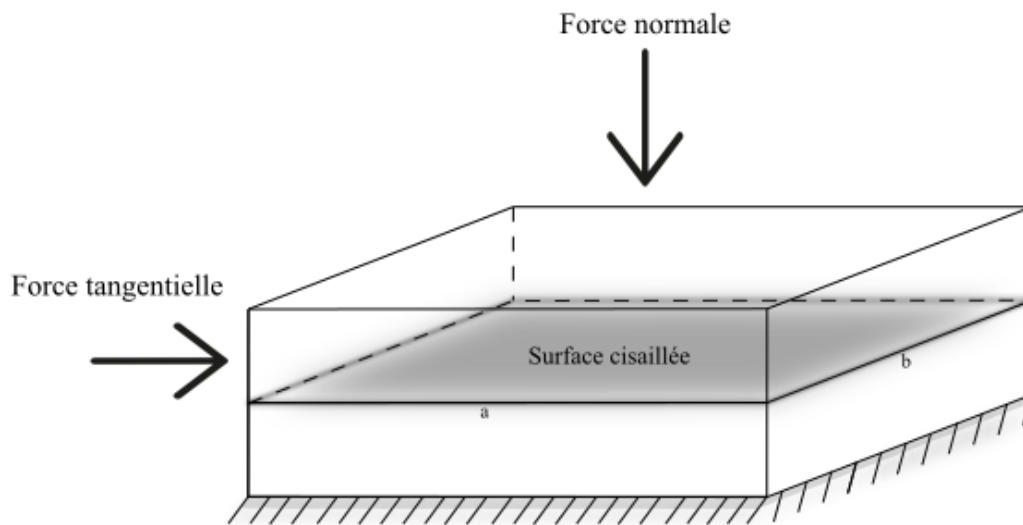


Figure 2.5 – Schématisation des contraintes en jeu sur un plan de discontinuité

En mécanique des roches, on expose le cisaillement par le glissement au long d'une discontinuité (a), d'un bloc appuyé. Ce dernier subit une force tangentielle constante par rapport à un bloc ancré sur une largeur (b), qui engendre un déplacement. Étant donné que cette étude travaille avec des joints présentant des plans préférentiels de rupture, ou des plans de faiblesse, les forces de cisaillement admissibles doivent être revues à la baisse par rapport à des résultats issus d'un essai sur un bloc intact (sans discontinuité).

Généralement, les résultats expérimentaux issus d'un essai de cisaillement direct (chapitre 4) expriment la contrainte au cisaillement (τ) d'une discontinuité selon un déplacement (δ) par rapport à la position initiale du joint et ce, à contrainte normale constante. La plupart du temps

⁸ Dans le contexte d'un barrage, la contrainte normale équivaut au poids du barrage.

un échantillon subit plusieurs essais de cisaillement à différentes contraintes normales, ex : 100 kPa, 200 kPa et 300 kPa. Ce processus entraîne des résultats plus élevés (étant donné que la contrainte normale augmente), cependant l'allure générale de la courbe demeure similaire. Cela permet également d'obtenir l'angle de frottement (φ) du joint. Tel qu'exposé par la figure 2.6, de la page suivante, cet essai permet de recueillir des données expérimentales essentielles sur la résistance au cisaillement d'un joint.

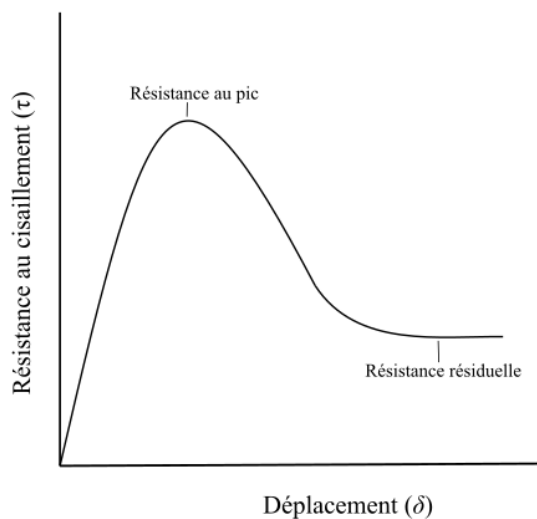


Figure 2.6 - Courbe de la résistance au cisaillement en fonction du déplacement

En plus de montrer l'allure la plus générale des courbes de cisaillement direct, la figure 2.6 introduit les concepts de résistance au pic et de résistance résiduelle. Au début de l'essai, le déplacement engendre une déformation élastique de l'interface jusqu'à la résistance au pic. Ce point particulier constitue la contrainte tangentielle maximale que peut subir une discontinuité pour une contrainte normale définie. Elle correspond à la limite élastique du joint après quoi, les aspérités commencent à rompre. On dit alors que l'interface tend vers son polissage ou encore vers sa résistance résiduelle. Cette dernière correspond à la résistance tangentielle nécessaire au déplacement constant (décider au début du processus) engendrer par l'essai suite à la rupture des aspérités [27]. Ces informations sont nécessaires à la qualification et à la quantification de résistance au cisaillement d'un joint. De plus, elles permettent l'utilisation et le raffinement des différents critères de stabilité empirique présentés à la sous-section suivante.

2.4. Critères de ruptures

Cette sous-section présente les différents modèles mathématiques applicables aux contraintes de cisaillement appeler : les critères de ruptures. Ces critères ont pour objectif de définir une zone limite (enveloppe de rupture) qui constitue l'état de contrainte à la rupture en cisaillement d'une interface. Les modèles orbitent autour de théories différentes concernant le comportement des joints confinés. Chacun d'entre-deux présente également des paramètres différents définissant les joints. Pour faciliter la compréhension, la figure 2.7 introduit le critère linéaire de Mohr-Coulomb qui fut le premier à être utilisé.

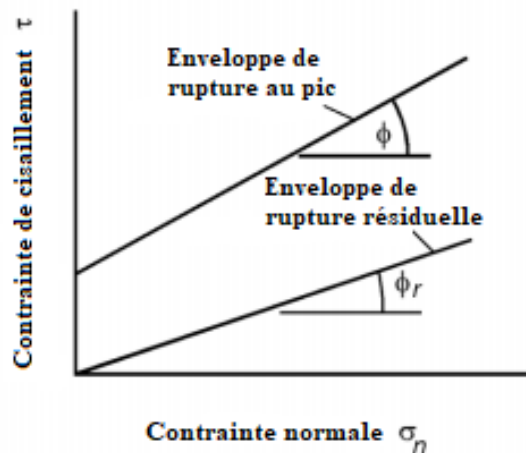


Figure 2.7 – Enveloppe de rupture du critère linéaire de Mohr-Coulomb

Les enveloppes de rupture définissent une droite exposant la résistance au cisaillement en fonction de la contrainte normale appliquée. Tel qu'il est possible de le voir sur la figure 2.7, il existe deux types limites soit, l'enveloppe de rupture au pic et l'enveloppe de rupture résiduelle ainsi que leur angle de frottement respectif (ϕ , ϕ_r). Ces droites sont issues directement des valeurs au pic et résiduelles obtenues pour un échantillon à des contraintes normales différentes. Cependant, il semble que le comportement des joints en cisaillement soit beaucoup plus complexe qu'une fonction linéaire entre la contrainte normale et tangentielle. Par conséquent, cette sous-section présentera également en ordre chronologique le modèle de Patton, le critère de LADAR ainsi que le critère de stabilité de Barton. Il est important de noter que ces critères de ruptures ont été conçus pour répondre à des besoins miniers (excavation dans des massifs rocheux fissurés et confinés) et non pour des joints béton-coulis ou roc-coulis. Cependant,

plusieurs études utilisant ces modèles pour des joints non rocheux ont montré que les différents critères représentaient efficacement le comportement au cisaillement des répliques rocheuses [28–31]. Certains paramètres sont présents pour les quatre (4) critères de rupture suivants :

- τ est la résistance au cisaillement d'un joint;
- σ est la contrainte normale appliquée à ce joint;
- c, c_o ou s_o est la cohésion apparente d'un joint;
- φ est l'angle de frottement d'un joint.

2.4.1. Critère Mohr-Coulomb

Le critère de Mohr-Coulomb, ou critère de M-C est le plus vieux critère de rupture à être encore utilisé aujourd'hui en mécanique des roches. La simplicité conceptuelle de ce modèle mathématique constitue d'ailleurs la base d'autres critères, comme celui de Patton. Le critère, développé par Coulomb, il y a près de 200 ans, a été inventé pour définir le comportement en cisaillement des sols (la mécanique des sols) [32]. Couramment utilisée en mécanique des roches pour les joints lisses, la roche intacte ainsi que les joints de répliques⁹, le critère de Mohr-Coulomb se définit par l'équation 2.2 :

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (2.2)$$

Où les variables ont été définies plus haut. Conceptuellement, ce critère intègre deux facteurs à la résistance au cisaillement : le premier étant la **cohésion apparente** de l'interface et le second étant le **frottement** de l'interface. Tel qu'il a été présenté à l'aide de la figure 2.7, le critère définit deux types d'enveloppes de rupture, une au pic (maximal) et une résiduelle (minimal) obtenus à l'aide d'essais de cisaillement direct. Ces enveloppes sont tracées par une courbe de tendance effectuée sur des couples (τ, σ_n) .

L'enveloppe de rupture maximale est définie à la fois par une résistance dictée par la contrainte normale (frottement) et par une force de cohésion. C'est-à-dire qu'un joint qui ne subit aucune contrainte possède une résistance d'adhérence initiale au cisaillement. Cette adhérence causée

⁹ En mécanique des roches, il est courant d'utiliser des mortiers possédant des propriétés mécaniques similaires à la roche comme réplique.

par les aspérités empêche le déplacement d'un joint sous faible contrainte tangentielle. La cohésion apparente est marquée sur la figure 2.8 par l'ordonnée à l'origine et sa valeur est définie par l'interpolation linéaire de la droite de tendance.

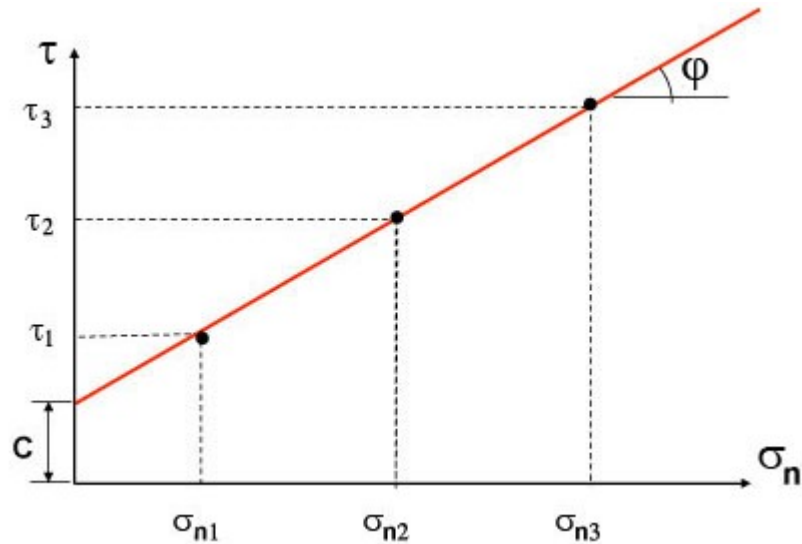


Figure 2.8 – Critère de Mohr-Coulomb¹⁰

L'angle de frottement au pic (φ_{pic}) est généralement plus élevé que le résiduel ($\varphi_{résiduel}$) étant donné que les aspérités n'ont pas encore atteint leur point de rupture. L'enveloppe de rupture au pic se définit alors par l'équation 2.3 :

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi_{pic} \quad (2.3)$$

La cohésion apparente n'est toutefois observée que pour l'enveloppe critique. Effectivement, une fois la rupture des aspérités survenue, il n'y a plus cohésion apparente, par conséquent l'enveloppe de rupture résiduelle débute à l'origine. C'est pourquoi le critère se définit par l'équation 2.4 :

$$\tau = \sigma \tan \varphi_{résiduel} \quad (2.4)$$

Cependant, il est possible de constater que la notion de cohésion apparente demeure discutable au sein de la communauté scientifique. Selon la littérature, une enveloppe de rupture serait plutôt définie par une courbe [14,33] remettant en question la première portion (partie à faible niveau

¹⁰ <https://hal.archives-ouvertes.fr/cel-01795697/document>

contrainte normale) du critère de Mohr-Coulomb qui se veut linéaire. Puisque cette partie intègre le concept de cohésion, il est difficile de définir son existence, d'où son nom cohésion apparente et non réelle. Ces ambiguïtés peuvent être à l'origine de surdimensionnement (si on ne considère pas la cohésion) lié aux approches conservatrices du domaine.

2.4.2. Critère de Patton

Le critère de Patton fut son apparition en 1966 dans le domaine de la mécanique des roches. Son objectif est de caractériser la résistance au cisaillement des joints lisses. Il utilise d'ailleurs le caractère (ϕ_u) pour définir l'angle de frottement de base des joints, c'est-à-dire sans rugosité. Ce paramètre issu de l'enveloppe de rupture est généré expérimentalement par une série d'essais où les contraintes tangentielle et normale sont respectivement parallèles et perpendiculaires au plan cisailé. Le modèle de Patton se distingue cependant de celui de Mohr-Coulomb par l'intégration de l'angle de dilatance et par l'absence de la notion de cohésion. Par conséquent, le modèle suggère qu'à contrainte normale nulle, il n'y a aucune résistance au cisaillement.

Sur un joint lisse, l'angle de dilatance peut être affecté par l'orientation de la force de cisaillement par rapport au plan cisailé. La figure 2.9 illustre dans ce cas précis l'impact de l'angle de dilatance sur l'enveloppe de rupture de Patton.

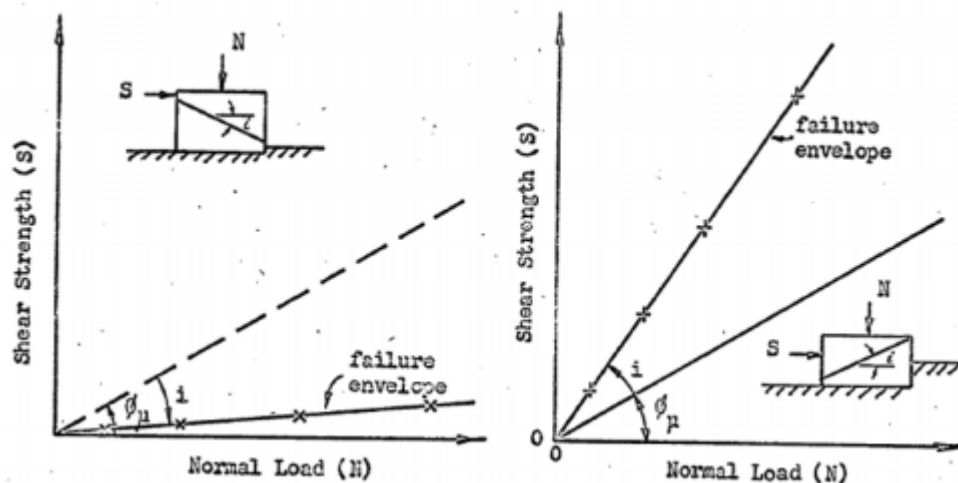


Figure 2.9 – Influence de l'angle du plan cisailé sur l'enveloppe de rupture [12]

Il est possible de voir que lorsque le plan de cisaillement n'est plus perpendiculaire aux forces qui lui sont appliquées, l'enveloppe de rupture subit des modifications. Dans le premier cas, le

cisaillement est facilité puisque le plan de glissement se fait dans la direction de la force. L'angle de dilatance est donc soustrait à l'angle de frottement de base générant une enveloppe de rupture beaucoup plus faible. Le deuxième cas illustre cette fois-ci l'addition de l'angle de dilatance, témoignant un cisaillement plus difficile engendré par l'orientation du plan.

L'angle de dilatance (i) se définit également par l'ondulation de la rugosité d'une discontinuité sur un joint dentelé. Par conséquent, la présence d'aspérités sur un joint entraîne (mouvement vertical durant le cisaillement), pour le modèle de Patton, l'addition de l'angle de dilatance à l'angle de frottement de base (φ_u). L'équation 2.5 définit alors le modèle mathématique de Patton :

$$\tau = \sigma \tan (\varphi_u + i) \quad (2.5)$$

Toutefois, le critère de Patton décrit difficilement la relation entre la contrainte normale et la contrainte de cisaillement à contrainte normale élevée. Étant donné que les aspérités sont généralement cisailées dans le contexte résiduel d'un essai, il devient difficile, voire impossible, d'estimer la résistance au cisaillement maximale (au pic) à l'aide de ce modèle. Dans ces cas-là, l'influence de la dilatance diminue ($(\varphi_u + i)$ devient φ_u) et le critère de Patton laisse généralement sa place au modèle de Mohr-Coulomb qui devient plus précis [34], on parle alors du critère bilinéaire de Patton-Coulomb.

2.4.3. Critère bilinéaire de Patton-Coulomb

L'enveloppe de rupture issue du critère bilinéaire de Patton-Coulomb est scindée en deux parties par un point d'inflexion séparant respectivement les modèles de Patton et de Coulomb. Ce critère s'appliquant aux conditions maximales (au pic) d'un essai de cisaillement permet d'éliminer les incohérences liées à leur modèle respectif. Tel que le montre la figure 2.10 de la page suivante, initialement (à contrainte normale faible) le critère ne présente aucune forme de cohésion. Pour cette partie, il se définit alors par l'équation 2.5. Jusqu'au point d'inflexion qui représente ici le début de la rupture des aspérités, l'enveloppe de rupture est conditionnée par l'angle de dilatance qui s'additionne (ou se soustrait) à l'angle de frottement de base. Après la rupture de ces aspérités, l'angle de dilatance est négligeable. C'est pourquoi la suite de

l'enveloppe de rupture (à contrainte normale élevée) est définie par le critère de Mohr-Coulomb, équation 2.3 [12,34].

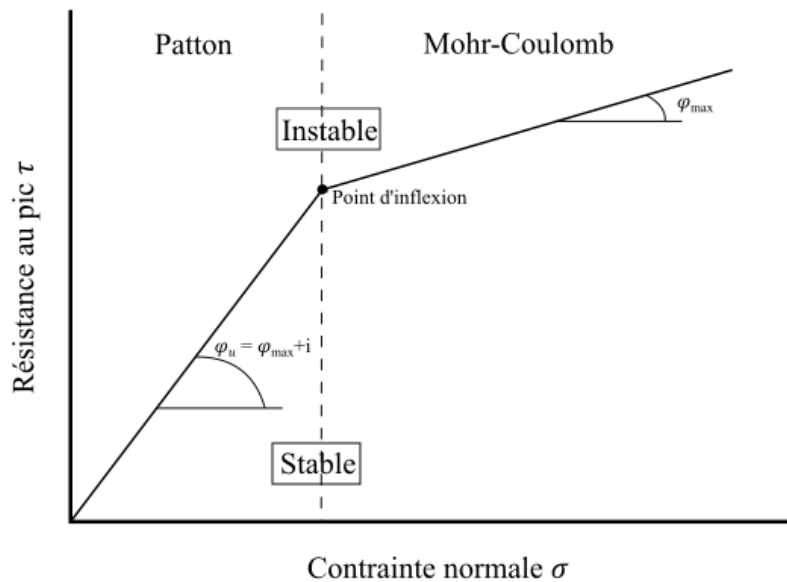


Figure 2.10 – Enveloppe de rupture du critère bilinéaire de Patton-Coulomb

Il est important de noter que lorsque l'état de contrainte est situé en dessous des droites, la discontinuité est jugée stable, tandis qu'au-dessus des droites, l'état de contrainte est instable : il y a théoriquement glissement de l'interface. Bien que le critère bilinéaire de Patton-Coulomb définit de façon plus qu'adéquate la résistance au cisaillement d'un joint rugueux (étant donné qu'il élimine les doutes quant à l'existence de la cohésion) le modèle demeure difficile à définir. Effectivement, le point d'inflexion contribuant aux symbioses des théories est subjectif et difficile à obtenir [28].

Pour finir, les trois modèles mathématiquement précédemment présentés ne comportent aucun concept de dégradation des interfaces. Même si le comportement au cisaillement peut être plus facilement défini avec l'évolution des théories entourant les enveloppes de rupture, il ne faut pas oublier que les discontinuités subissent des variations de surface lors de la dégradation des aspérités et que cette altération peut affecter la résistance au cisaillement des joints en modifiant le comportement de la dilatance [35].

2.4.4. Critère de LADAR

C'est en 1969 à l'École Polytechnique de Montréal que Ladanyi et Archambault ont soumis leur modèle mathématique visant à étudier et à reproduire le comportement en cisaillement d'un massif rocheux fracturé [14]. Le critère de LADAR qui se veut non-linéaire, permet théoriquement de connaître la résistance au cisaillement en tout point de la fonction effort-déplacement [36]. Initialement fortement inspiré par le concept de dilatance issu du modèle de Patton, le critère de LADAR prend en considération deux modes de cisaillement différents liés à ce mouvement vertical, ce que le modèle de Patton ne fait pas. Ces modes sont : la dilatance sans cisaillement des aspérités et le cisaillement des aspérités sans dilatance.

Par conséquent, pour ce critère, la résistance au cisaillement d'un joint (τ) est fonction de cinq (5) paramètres : la contrainte normale appliquée à au plan de discontinuité (σ_n), de l'angle de frottement résiduel (φ_r), de la dilatance engendrée par les aspérités (\dot{v}), du pourcentage cisailé (rupture) de la surface totale (a_s) ainsi que de la résistance au cisaillement de ces aspérités (S_r). L'équation 2.6 illustre cette relation :

$$\tau = \frac{\sigma_n (1-a_s)(\dot{v} + \tan\varphi_r) + a_s S_r}{1 - (1-a_s)(\dot{v} \tan\varphi_r)} \quad (2.6)$$

Le critère de LADAR se base essentiellement sur l'addition de deux termes distincts pour définir la résistance au cisaillement. Le premier défini par $(1 - a_s)$, étant la résistance apportée par les aspérités qui n'ont pas atteint la rupture (dans la zone résiduelle). Étant donné que les aspérités ne sont pas toutes égales (même envergure, forme, etc.), elles n'ont pas toutes la même résistance au cisaillement¹¹. Ce terme est fonction de la contrainte normale, de l'angle de frottement ainsi que de la dilatance. Le deuxième terme ($a_s S_r$) correspond à la résistance au cisaillement apportée par les aspérités qui seront cisailées. Il est fonction de la résistance des aspérités ainsi que de la proportion surfacique des aspérités qui seront cisailées. Ce terme décroît donc à mesure que le nombre d'aspérités cisailé augmente.

¹¹ Ce passage constitue un des concepts introduits par le critère LADAR étant donné que le modèle de Patton considère que les propriétés physiques et mécaniques des aspérités sont toutes équivalentes.

Comme introduit précédemment, le critère propose le concept d'évolution de la résistance au cisaillement selon la rupture progressive des aspérités [37], cependant deux paramètres, la proportion des aspérités cisillées et la dilatance, peuvent être calculés à l'aide des équations 2.7 et 2.8 :

$$a_s = 1 - \left(1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_t}\right)^{K_1} \quad (2.7)$$

$$\dot{v} = 1 - \left(1 - \frac{\sigma_n}{\sigma_t}\right)^{K_2} * \tan i_0 \quad (2.8)$$

Où les variables K_1 et K_2 représentent des constantes empiriques propres au matériau et difficilement mesurables. σ_t est la contrainte de transition de la roche, c'est-à-dire le point de pression où ce matériau passe d'un comportement fragile à un comportement ductile. Pour finir, i_0 représente l'angle moyen des aspérités de la discontinuité.

Les équations 2.7 et 2.8 permettent de voir que lorsque la contrainte normale est nulle ($\sigma_n = 0$), la dilatance est maximale tandis que le pourcentage des aspérités ayant subi une rupture est nul et vice-versa.

Le modèle LADAR constitue une évaluation beaucoup plus complète de la résistance au cisaillement d'un joint, notamment par l'introduction du concept de dilatance des aspérités. Il permet également de prédire en tout point de la courbe effort-déplacement, la résistance au cisaillement. Cependant, le critère présente une multitude de paramètres, tel que le degré d'imbrication qui est difficile à établir et contraignante à utiliser dans la pratique.

De plus, la théorie entourant ce modèle s'applique aux joints présents dans un seul matériau tel que des massifs rocheux discontinus. Son applicabilité dans le cadre de cette étude visant à étudier des interfaces de deux matériaux différents soit, roc-coulis ou béton-coulis, est difficilement justifiable.

2.4.5. Critère de stabilité de Barton

Le critère de Barton est considéré comme un modèle semi-empirique, c'est-à-dire qu'il inclut un minimum de coefficients issus directement d'essais en laboratoire. Il permet de tracer l'enveloppe de rupture maximale en plus de montrer le comportement non linéaire de la résistance au cisaillement des massifs rocheux fracturés [13]. La formule 2.9 décrit l'enveloppe de rupture formée par ce critère de stabilité :

$$\tau = \sigma \tan \left[JRC \log \left(\frac{JCS}{\sigma} \right) + \varphi_r \right] \quad (2.9)$$

où le JRC (Joint Roughness Coefficient) et le JCS (Joint Wall Compression Strength) constituent les deux coefficients déterminés empiriquement. Le JRC correspond à la rugosité du joint prenant une valeur qui varie de 1 à 20 et le JCS représente la résistance à la compression uniaxiale (UCS) de la roche fracturée. Notons que pour cette équation, il est nécessaire de connaître l'angle de frottement altéré (φ_r), à ne pas confondre avec l'angle de frottement résiduel. Dans le cas où la surface cisailée ne serait pas altérée, le modèle prend généralement l'angle de frottement de base (φ_b) [33]. De plus, critère de Barton néglige l'existence de la cohésion le plaçant en complète opposition avec le modèle de Mohr-Coulomb.

Le modèle de Barton ne fait également aucune distinction entre l'enveloppe résiduelle et au pic, menant à établir que la résistance au cisaillement maximale est fonction des facteurs empiriques (JCS et JRC). Selon ces théories, à contrainte normale égale ou supérieure à l'UCS de la roche, l'angle de dilatance, montré par l'équation 2.10, devient nul ou négatif [37]. La détermination des coefficients JCS et JRC devient donc nécessaire à la définition de l'enveloppe de rupture du critère de Barton.

$$i = JRC \log \left(\frac{JCS}{\sigma} \right) \quad (2.10)$$

Le coefficient de rugosité JRC peut être trouvé de différentes façons. La première consiste à effectuer une comparaison visuelle de la rugosité entre les interfaces à l'aide de la figure 2.11

fournie par Barton et Choubey [38] pour déterminer une valeur de profil entre 1 et 20. Bien que cette méthode demeure subjective, il est possible d'utiliser des méthodes quantitatives.

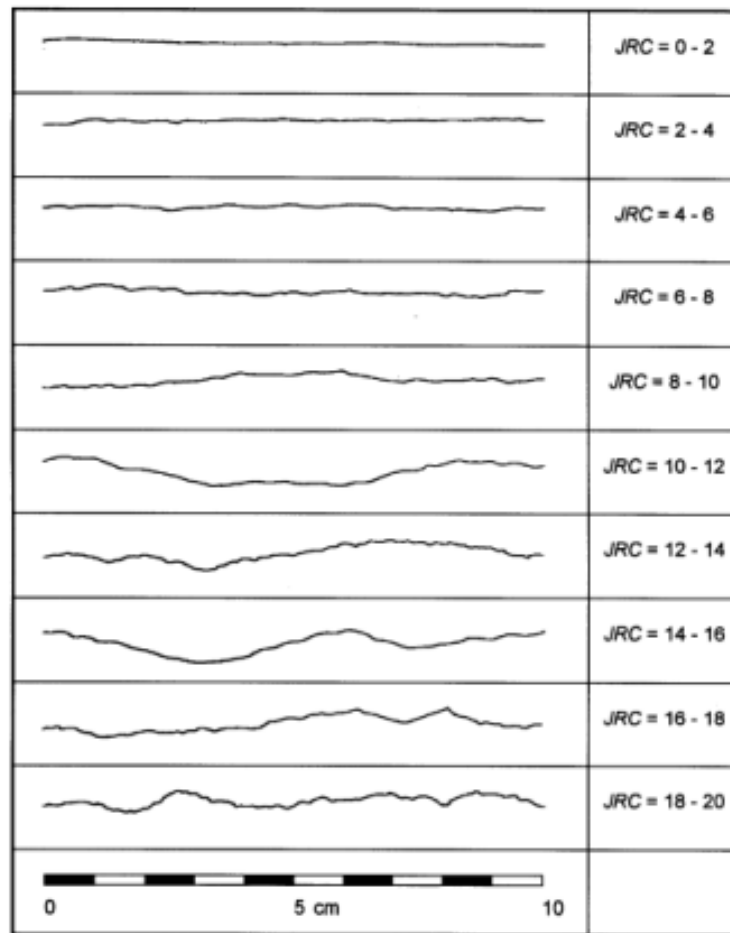


Figure 2.11 – Profils de rugosité et JRC équivalent [39]

Généralement, l'utilisation d'un profilomètre laser (présenté dans le chapitre 4) permet d'établir le profil d'une surface par la corrélation spatiale des points composant cette surface. On appelle ce procédé «variographie» [28]. De cette façon, il est possible de calculer des paramètres statistiques (sous-section 2.5) contribuant au calcul de la rugosité¹², ou dans ce cas-ci, du coefficient JRC. La deuxième méthode consiste l'utilisation de l'équation 2.11 :

$$JRC = (\arctan\left(\frac{\tau}{\sigma}\right) - \varphi_b) / \log\left(\frac{\sigma_c}{\sigma}\right) \quad (2.11)$$

¹² Les calculs sont faits à l'aide de logiciel tel que Matlab, présenté dans le chapitre 4 du document.

où τ et σ sont des valeurs moyennes obtenues lorsque la résistance au cisaillement maximale a été atteinte et σ_c correspond à la contrainte uniaxiale de compression de la roche. Pour utiliser cette équation, il faut d'abord avoir fait des essais mécaniques de cisaillement et de compression sur la roche en question. Il faut également obtenir l'angle de frottement de base (par l'expérimental) d'un joint lisse. À noter qu'une modification de σ_c à $\sigma_c/4$ est effectuée sur les joints dégradés. Par sa grande complexité, cette méthode est généralement moins utilisée que la méthode quantitative au profilomètre laser pour déterminer la rugosité (JRC) d'une interface.

Le JCS constitue le degré d'altération d'un joint. Ce dernier justifie d'ailleurs la limitation quant à l'utilisation complète de l'utilisation de l'UCS de la roche. Ce coefficient est déterminé à l'aide du marteau de Schmidt ou encore par l'essai de compression. Il peut y avoir des problèmes d'imprécisions liés au fait que la plupart du temps les surfaces sont de petite taille par rapport au marteau [40], c'est pourquoi la méthode de compression est généralement préférée.

Bien qu'il présente de nouveaux concepts établissant bien le comportement au cisaillement des joints rocheux, le modèle de Barton ne prend pas en considération le concept de rupture progressive des aspérités. De plus, certaines études témoignent du fait que le coefficient de rugosité peut varier en fonction de la charge normale appliquée.

Dans le cadre de cette étude, les notions de Barton sont surtout employées pour son coefficient de rugosité. Ce dernier permet de témoigner de l'évolution directe de la physionomie d'un joint et ce faisant, de qualifier la dégradation subie. La détermination du JRC permet également de quantifier le vieillissement subi sur une interface qu'elle soit cimentaire ou rocheuse. L'objectif final étant que : les résultats soient explicites et facilement comparables pour le domaine de la mécanique des roches.

Cependant, tel que mentionné plus haut, l'obtention du JRC nécessite la caractérisation de la rugosité via différents paramètres statistiques. Ces derniers sont exposés à la sous-section suivante.

2.5. Caractérisation de la rugosité d'interface

La rugosité d'interface est l'une des principales composantes à la résistance au cisaillement d'un joint. Elle se définit essentiellement par deux concepts soit : le frottement global ainsi que la géométrie générale de l'interface composée par les aspérités. Le frottement est directement issu des essais de cisaillement effectué sur un joint lisse, il est donc fonction du matériau testé. En ce qui a trait à la composante géométrique, cette dernière dépend de l'amplitude et de l'angularité des aspérités du joint. Dans le but de quantifier la rugosité avec un coefficient de rugosité (JRC), cette sous-section traite plus en détail de la composante géométrique de la rugosité par les différents paramètres statistiques qui la définit. Ces paramètres sont respectivement : CLA, RMS, Z_2 , Z_3 , Z_4 ainsi que R_L .

CLA ou encore, *center line average*, représente la hauteur moyenne de la ligne médiane. Ce paramètre permet de caractériser la rugosité d'un joint dans sa globalité en étudiant l'élévation des aspérités par rapport à une surface de référence, le plan moyen ou encore le plan horizontal. Le CLA constitue donc la moyenne arithmétique des hauteurs. Le CLA est défini par l'équation 2.12 :

$$CLA = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i^2 \quad (2.12)$$

Où N est le nombre de mesures et z est la hauteur par rapport au plan de référence. Le CLA ne tient cependant pas en considération du sens des aspérités. Par exemple, deux aspérités opposées de 2 mm d'amplitude (une positive par rapport au plan moyen et une négative par rapport au plan moyen) engendrent un CLA égal à 0 malgré la différence de 4 mm qui sépare leur sommet.

RMS, root mean square, représente la carrée du CLA (hauteur moyenne des aspérités). Tout comme le CLA, le RMS permet de caractériser la rugosité d'un joint dans sa globalité. Un RMS élevé désignera une grande rugosité et vice-versa. Il peut être calculé suivant l'équation 2.13 :

$$CLA = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N z_i^2} \quad (2.13)$$

Z_2 représente la pente reliant deux aspérités sur un profil bidimensionnel (Figure 2.12). Ce paramètre est très sensible à l'intervalle de mesure, qui dans le cas de l'étude correspond à la résolution choisie du profilomètre. Ce paramètre est initialement nul, dans le cas où la rugosité est inexistante et s'accroît avec la présence d'une rugosité marquée.

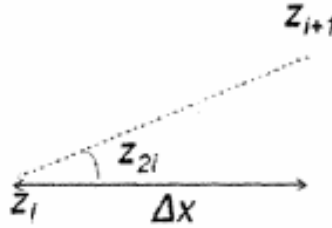


Figure 2.12 – Représentation de la signification du paramètre Z_2 [41]

Mathématiquement, Z_2 peut être calculé grâce à la sommation de la dérivé (pente) des élévations des aspérités. Cette sommation suit l'équation 2.14 :

$$Z_2 = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \left[\frac{z_{i+1}-z_i}{x_{i+1}-x_i} \right]^2} \quad (2.14)$$

Z_3 est lié à l'évolution de la dilatance de l'interface. Il permet de représenter efficacement la période de transition de la dilatance lors d'un essai de cisaillement à l'aide d'un rayon de courbure. La figure 2.13 schématise le paramètre.

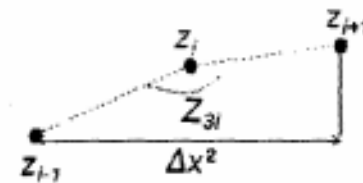


Figure 2.13 – Représentation de la signification du paramètre Z_3 [41]

Tout comme Z_2 , Z_3 augmente avec la rugosité. Le paramètre Z_3 peut être trouvé grâce à l'équation 2.15 :

$$Z_3 = \sqrt{\frac{1}{N-2} \sum_{i=1}^{N-2} \left[\frac{(z_{i+2}-z_i)-(z_{i+1}-z)}{(x_{i+1}-x_i)^2} \right]^2} \quad (2.15)$$

Z_4 est le rapport des pentes d'aspérités, positif ou négatif, sur un profil de longueur L . Il permet entre autres de savoir si le joint adopte un comportement contractant (compression) ou dilatant (extension). La figure 2.14 expose le concept de Z_4 .

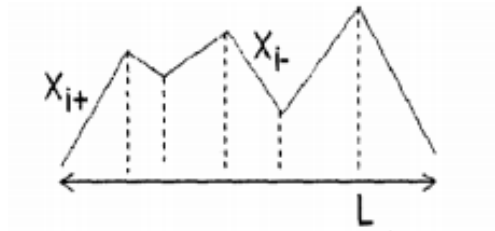


Figure 2.14 – Représentation de la signification du paramètre Z_4 [41]

Adoptant généralement des valeurs inférieures à 1, le paramètre permet de connaître la proportion de matériel mobilisable lors d'un essai de cisaillement. On peut le calculer grâce à l'équation 2.16 :

$$Z_4 = \frac{\sum x_{positif} - \sum x_{négatif}}{L} \quad (2.16)$$

R_L est la rugosité linéaire qui est représentée par le rapport entre la longueur totale d'un profil sur la projection de cette longueur. Plus la rugosité est élevée, plus la rugosité linéaire le sera également. La figure 2.15 schématise ce nouveau concept.

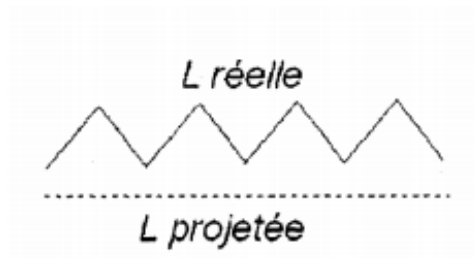


Figure 2.15 – Représentation de la signification du paramètre R_L [41]

Il est possible de calculer la rugosité linéaire à l'aide de l'équation 2.17 :

$$R_L = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2}}{L} \quad (2.17)$$

Tous ces paramètres sont utiles à l'élaboration d'un coefficient de rugosité qui sera présenté dans le chapitre 4. Cependant, Tse et Cruden [42] ont montré qu'il existait une forte corrélation entre le paramètre Z_2 et le JRC de Barton. L'équation 2.18 témoigne du résultat obtenu de leurs recherches :

$$JRC = 32,2 + 32,47 \log (Z_2) \quad (2.18)$$

Par sa simplicité, cette relation est l'une des plus utilisées pour trouver directement le JRC. Elle a été obtenue grâce à la reproduction de plusieurs profils de Barton. À l'aide de relevé topographique effectué sur ces profils, près de 200 mesures ont été prises pour chacun d'entre eux ou le JRC était préalablement connu. Les résultats issus de cette expérience définissent aujourd'hui l'équation empirique 2.18 [28].

3. Dégradation d'interface

3.1. Contextualisation

Les modèles de cisaillement présentés au chapitre 2 soit, Mohr-Coulomb, Patton, LADAR ainsi que Barton [12–14] peuvent représenter le comportement mécanique des plans de discontinuités face aux contraintes normales et aux contraintes de cisaillement. Dans le domaine hydroélectrique, ces plans correspondent aux fractures dans le roc, aux joints (ou fissures) de béton ainsi qu'aux interfaces roc-béton. Bien que quelques-uns de ces modèles intègrent des notions de rupture progressive des aspérités (baisse progressive de la résistance au cisaillement), aucun ne considère la détérioration de l'interface à travers le temps, qui représente pourtant l'un des paramètres de classification des ouvrages au Québec. Pour un barrage en béton, le pointage associé à l'âge de celui-ci augmente avec le temps, ce qui définit l'ouvrage comme plus risqué. Pourtant, la dégradation d'un joint peut modifier la valeur de paramètres comme la rugosité, la forme des aspérités, la cohésion apparente, qui composent la base de leurs théories respectives.

Par conséquent, il existe un manque évident dans la littérature au niveau de l'évolution du comportement mécanique des discontinuités ayant subi une dégradation. L'état des réparations de fissures effectuées à l'aide de coulis cimentaire est au cœur de cette incertitude étant donné qu'elle témoigne de l'efficacité mécanique ou encore l'étanchéité d'un joint de béton ou d'une fracture de roc. Par exemple, Salimian et al., 2017 [30] ont montré que les réparations de coulis dans un joint rocheux contribuaient à l'augmentation globale de la résistance au cisaillement d'un joint. Bien que ce type d'injection n'ait pas comme but premier d'augmenter les propriétés mécaniques au cisaillement d'une discontinuité, il n'en demeure pas moins que sa dégradation diminue la cohésion de ce joint. Leurs détériorations peuvent s'effectuer via la présence de glace (cycle de gel-dégel), par cycle thermique, par une forte concentration d'ions dans l'eau ou encore via un écoulement dans la discontinuité. Cependant, il demeure difficile de qualifier et de quantifier le niveau de dégradation global des interfaces, étant donné que la plupart de ces joints sont situés dans des endroits quasi inaccessibles.

Les fissures dans le roc et dans le béton des barrages constituent deux types d'interfaces différentes au niveau de leur dégradation durant la vie utile d'un ouvrage. Ces deux types de

discontinuités ne sont pas soumises aux mêmes valeurs de pressions ou aux mêmes facteurs généraux causant la dégradation. Par exemple, les discontinuités rocheuses subissent de fortes pressions hydrauliques étant donné qu'elles sont situées au point le plus bas du bassin de rétention. Cependant, leur situation fait en sorte que les joints rocheux subissent de faibles variations de température et ne sont pas soumis aux cycles de gel-dégel ou encore aux changements de température liés aux rayonnements solaires. Tandis que les fissures présentes dans le béton des barrages sont exposées aux intempéries (cycles de gel-dégel, des cycles thermiques, ainsi que les précipitations), mais elles sont soumises à de plus faibles pressions internes.

La sous-section suivante divise les différents types de dégradations les plus susceptibles de survenir dans le domaine hydroélectrique en deux catégories : les détériorations chimiques et les détériorations mécaniques que ces types d'interfaces peuvent subir.

3.2. Dégradation d'interface

L'objectif de cette revue de littérature est d'identifier les facteurs de dégradation qui sont omniprésents en ce qui a trait à la dégradation des injections de coulis dans les fondations rocheuses ou dans le béton. De cette façon, les dégradations ont été reproduites le plus fidèlement possible par des essais accélérés en laboratoire. Dans la littérature il est possible de trouver quelques d'articles en lien avec la détérioration des injections de coulis de ciment. Ces ouvrages, une fois mis en commun, peuvent amorcer des réflexions quant à la définition du phénomène de vieillissement ou encore influencer la présente étude en ce qui a trait aux paramètres affectant l'état des coulis présents dans les interfaces rocheuses et de béton. Les différents paramètres modifiant les propriétés mécaniques des injections ainsi que de l'étanchéité des joints y sont présentés, décrits et justifiés. Bien que ces études, dans la plupart des cas, ne prennent pas en considération le dimensionnement à long terme (50 ans et plus) ou encore qu'elles ne soient pas reliées directement aux ouvrages de retenue des eaux, elles demeurent connexes au champ d'expertise [24,35,43–51].

3.2.1. Injections dans les fondations rocheuses

Tetel'min et al. 1992 ont étudié les processus de détériorations des injections de ciment dans des fondations rocheuses de calcite des barrages. Ces derniers ont établi que la détérioration des injections qui se produit sous le barrage est déclenchée par la présence d'eau, que ce soit pour la calcite ou encore pour les matériaux cimentaires. Étant donné qu'une présence d'eau est inévitable à cet endroit, la détérioration des réparations de coulis cimentaire ou des fondations rocheuses elles-mêmes, semble inévitable. Il est mentionné dans l'ouvrage littéraire que ces dégradations agiraient par la dissolution des hydroxydes de calcium présent dans les matériaux. Les auteurs ont également estimé que la durée de vie utile des réparations de coulis de ciment ou du voile d'injections dans les barrages en béton serait d'une durée de 20 à 30 ans¹³ [43].

Bien qu'ils n'aient pas directement travaillé avec des coulis cimentaires, Romanov et al., 2003 ont étudié en simulation les effets de l'écoulement de l'eau à travers un réseau de joint rocheux présent dans les fondations d'un barrage. Ces derniers ont démontré, à l'aide de leur modèle qui effectuait des itérations sur un roc de type calcaire, que l'ouverture des fractures d'un massif rocheux prenait de l'expansion avec l'augmentation de la vitesse de l'écoulement [44]. Selon eux, la vitesse de l'écoulement engendre une détérioration mécanique de type érosive sur les discontinuités rocheuses. On parle alors de deux types de dégradations apportés par la présence de l'eau soit, la dissolution chimique et l'érosion mécanique des interfaces.

Pedro et al. 1995 ont établi que le niveau de détérioration des injections de coulis dans les fondations des barrages est principalement occasionné par l'écoulement de l'eau et que celui-ci amplifie le phénomène de vieillissement des ouvrages de retenue des eaux. Premièrement, cet écoulement qui circule à travers les fissures engendre une détérioration chimique en attaquant les calciums présents dans les injections ou dans le roc de type calcaire. Deuxièmement, par sa vitesse et sa pression il occasionne une dégradation mécanique sur les réparations de coulis, l'érosion. Les auteurs rapportent que ces deux facteurs dépendent respectivement du pH de l'eau ainsi que de la vitesse de l'écoulement, qui dépend de la pression interne occasionnée par le

¹³ Selon des investigations canadiennes, après 30 à 40 ans les injections de coulis de ciment seraient considérablement détériorées [51].

niveau d'eau du réservoir. De plus, Pedro et al., affirment que la cinétique de dégradation engendrée par la dissolution aqueuse est inversement proportionnelle à la vitesse d'écoulement de l'eau à travers le réseau de joint, c'est-à-dire qu'une vitesse d'écoulement élevé ne laisse pas le temps aux ions de dissoudre la microrugosité d'interface. Cependant, dans le cas où la vitesse de l'écoulement augmenterait, la détérioration totale¹⁴ demeurerait plus grande étant donné qu'un plus grand volume d'eau traverserait la fracture rocheuse engendrant une hausse de la composante mécanique, l'érosion. Pour finir, les auteurs mentionnent que le phénomène de vieillissement dans les fondations des barrages est un sujet peu développé dans le domaine hydroélectrique [24].

Les détériorations mécaniques dans les fondations rocheuses sont majoritairement définies par le phénomène d'érosion qui est fonction de la vitesse d'écoulement qui régit, selon la rugosité des fissures, le type d'écoulement, soit laminaire ou turbulent. Cependant, la dissolution du coulis de ciment présent dans les interfaces est plus complexe. C'est d'ailleurs sur les effets de la décalcification des coulis cimentaires à l'aide de nitrate d'ammonium que Carde et al. 1999 ont effectué leurs recherches. L'équipe a établi que cette perte de calcium dans le coulis de ciment se fait en deux étapes lorsque le produit est soumis à une solution agressive (fortement ionique). Tout d'abord, il y a dissolution de la portlandite ainsi que décalcification dans les carbonates et, ensuite seulement la dissolution de la portlandite. L'étude fait part d'une augmentation de la porosité qui serait proportionnelle à une augmentation de la perméabilité ainsi qu'à des pertes minimales des propriétés mécaniques [45].

D'autres groupes de recherche tels que Brianzoni et al. 2013 se sont intéressés aux détériorations salines et acides des coulis cimentaires. À l'aide de solutions de H_2SO_4 et de K_2SO_4 , l'équipe a dégradé des échantillons afin d'analyser l'évolution de la porosité. Ils ont entre autres rapporté que la perméabilité d'interface est directement liée à la concentration en SO_4 présente dans les solutions aqueuses [46]. Les auteurs expliquent que la dégradation engendre initialement une baisse porosité qui est rapidement suivie par une hausse de la perméabilité. Avec le temps, ils ont continué d'observer une hausse constante, quoique plus faible, de la perméabilité dans le coulis de ciment de rapport $E/C = 0,5$.

¹⁴ Équivalent à la somme de la dégradation engendrée par dissolution et par l'érosion.

Laver et al. 2013 ont également étudié les interactions entre les coulis de ciment et les solutions à base de sulfates. Ces derniers ont également inclus les dégradations à base de carbonates dans leurs recherches. Leur étude effectuée à l'aide de six échantillons prélevés dans les tunnels du métro de Londres, a abouti aux mêmes conclusions que celles qui ont été mentionnées précédemment, c'est-à-dire, une augmentation de la porosité avec le temps d'exposition aux solutions aqueuses [47].

Les détériorations par dissolution des injections de coulis de ciment associées à la décalcification par divers produits agressifs semblent difficilement contournables. C'est pourquoi A. Bruce 1992 affirme que la sélection des produits d'injection (1992) est inappropriée. L'auteur rappelle que l'efficacité des injections de coulis diminue avec le temps étant donné qu'ils sont constamment en contact avec l'eau et que les coulis cimentaires sont solubles. Par conséquent, ce type de matériau ne peut être que temporaire lorsqu'il est dans les fondations rocheuses. Par conséquent, l'étude fait part de plusieurs méthodes telles que les injections chimiques ainsi les injections à base d'époxy qui demeurent une solution, à première vue, faiblement recommandable sur le plan économique [48].

Ballivy et al. 1990, ont montré, à l'aide d'essais effectués sur un perméamètre allant jusqu'à des pressions de 30 MPa, qu'il est possible de diminuer la perméabilité des roches injectées avec le temps lorsque qu'aucune altération physique n'est en fonction. Effectivement, en modifiant la formule de base des coulis, c'est-à-dire en y ajoutant des adjuvants et de la fumée de silice, la perméabilité à long terme de l'injection tend vers celle de la matrice rocheuse. Cependant, la vitesse d'écoulement doit être nulle pour que les conditions de développement soient respectées [49].

Certains groupes de recherches se sont aussi intéressés à la dégradation par dissolution des joints rocheux. L'équipe de Nouailletas et al. 2017, a réalisé une étude par rapport à l'impact que pouvaient avoir les composés carbonatés (dissolution acide) sur l'évolution de la résistance au cisaillement d'un joint ainsi que sur les changements des paramètres de rugosité. Les auteurs ont mentionné que l'immersion des éprouvettes dans l'acide n'avait affecté que faiblement la

rugosité globale des interfaces, signe que les interfaces rocheuses seraient plus résistantes que le coulis [35].

À la lumière de ces informations, il est possible d'établir que la présence d'eau constitue le principal facteur de dégradation des interfaces roc-coulis présent dans les fondations rocheuses des barrages. L'eau (pH=6-8) constitue un agent corrosif pour le coulis cimentaire (pH=13-14) selon deux facteurs, chimique (dissolution) par la présence d'ions et mécanique par la vitesse de l'écoulement (érosion). Étant donné qu'il est impossible d'empêcher la circulation de l'eau dans les fondations des barrages, les coulis cimentaires subissent forcément des dégradations. De plus, il semblerait que le processus de détérioration inclut également la dégradation des surfaces rocheuses, à un rythme cependant plus faible.

3.2.2. Injections dans les joints de béton

Dans la littérature, on retrouve principalement les mêmes facteurs de dégradations pour les injections de coulis dans le béton que dans les fondations rocheuses. La dégradation par la présence d'eau, ou par son écoulement semble être le type de dégradation le plus néfaste pour la conservation des produits cimentaires (coulis et béton). Certains auteurs mentionnent aussi la dégradation par les cycles thermiques [52–54], cependant pour des soucis de comparaison entre la dégradation des joints roc-coulis et de béton-coulis, ces types de dégradation ne sont pas investigués dans cette étude. De plus, tel qu'il a été mentionné dans plusieurs des études présentées à la sous-section 3.2.1, la dégradation par écoulement des produits cimentaires permet d'effectuer les essais en accélérer en modifiant le pH ou la vitesse d'écoulement. La dissolution des injections par rapport au dimensionnement à long terme (500 ans) a été étudiée par Kari et Puttonen qui se sont intéressés aux détériorations occasionnées sur des injections de ciment effectuées dans les fissures de béton à 100 mètres de profondeur sur un site d'enfouissement de déchets nucléaires. Ces derniers ont montré à l'aide de leur modèle qu'à cette distance, la vitesse d'écoulement de l'eau était trop faible pour être prise en compte, mais que la dissolution des carbonates était le principal facteur de la détérioration des injections puisqu'elle diminue le pH de l'eau [50]. La dissolution des injections de ciment dans les bétons est globalement similaire à celles dans le roc. Cependant, l'écoulement acide peut également

engendrer des dommages supplémentaires sur le béton par rapport au roc, en plus des injections de ciment. Les injections de coulis de ciment dans le béton semblent se dégrader de façon similaire aux injections de coulis cimentaire dans le roc lorsqu'ils sont soumis aux mêmes conditions corrosives. Pour cette étude, le facteur de dégradation choisi semble être également le plus flagrant : l'écoulement de l'eau à travers un joint.

3.3. Conclusion

Dans le domaine des barrages en béton, il est difficile d'obtenir toutes les informations nécessaires à la bonne compréhension de la détérioration des injections de coulis de ciment. Tout d'abord, ces injections sont souvent enfouies sous 20 mètres béton, leur accès est donc très difficile. Le vieillissement des réparations des interfaces constitue également un phénomène qui est difficile à cerner étant donné qu'il dépend des conditions propres à l'ouvrage, comme le climat ou la pression d'eau dans les fissures. Un manque au niveau des connaissances présentes dans la littérature se fait sentir. L'évolution du comportement mécanique des discontinuités à travers la durée de vie des ouvrages demeure un sujet peu investigué dans ce domaine d'expertise. Des études ont été faites par rapport aux dommages occasionnés sur les injections de coulis selon certains facteurs, mais l'évolution des dégradations à travers le temps n'est majoritairement pas considérée.

Cependant, cette revue de littérature permet de faire point sur une partie des recherches effectuées jusqu'à présent. De plus elle permet d'établir plusieurs liens en ce qui concerne les facteurs influençant le phénomène de vieillissement soit, la dissolution, l'érosion mécanique ainsi que les cycles thermiques. Tout d'abord, la présence d'eau, inévitable dans les fondations d'un barrage ou encore dans les fissures présentes sur les ouvrages, favorise grandement la détérioration complète des coulis de ciment. Les injections qui ont pour objectif d'étanchéifier le barrage se retrouvent complètement détruites après une période variant de 30 à 50 ans. Ce facteur de détérioration serait celui qui occasionne les plus grands dommages pour les deux types d'interfaces étudiés.

Par la suite, il a été montré que l'écoulement de l'eau peut dégrader les interfaces via deux procédés principaux, c'est-à-dire la dissolution, dépendant du pH de l'écoulement et l'érosion

mécanique qui, est en lien direct avec sa vitesse. Cependant, les dégradations associées à la dissolution par écoulement diminuent avec l'augmentation de la vitesse. Il faut toutefois considérer que la dissolution des coulis se fait en deux étapes distinctes, et que l'utilisation expérimentale d'un pH trop faible pourrait éloigner les valeurs obtenues des valeurs de détériorations in situ. Il a également été montré que les milieux agressifs (acide) augmentaient fortement la porosité du coulis, diminuant l'efficacité des injections. C'est pour toutes ces raisons que plusieurs auteurs pensent que les injections à base de coulis de ciment sont inappropriées et certains groupes de recherche ont tenté de modifier certaines composantes du coulis. Le gel-dégel constitue également un facteur de détérioration qui n'est pas examiné dans cette étude. Des auteurs ont identifié que ces détériorations mécaniques peuvent élargir les fissures, endommageant ainsi l'ouvrage, le rendant plus perméable à l'eau dans le cas d'un barrage. Cependant, ce facteur de dégradation ne touche qu'une faible partie des joints et il est globalement moins dommageable pour le coulis cimentaire que l'écoulement de l'eau. Le second défi de cette étude¹⁵ consiste à produire une détérioration similaire à celles des ouvrages qui ont été construits il y a près d'un demi-siècle. Ces détériorations sont appliquées sur une période réduite d'environ deux mois. L'analyse faite sur les éprouvettes ayant subi du vieillissement permet également de diriger le projet vers l'analyse non destructive d'interfaces dégradées. Pour finir, les objectifs spécifiques de recherche sont d'identifier et de quantifier les effets du vieillissement sur une réparation de coulis de ciment soumis à un écoulement neutre et acide sur des fissures dans le roc et dans le béton.

¹⁵ Le premier étant d'identifier le facteur de dégradation principal des interfaces de coulis cimentaire.

4. Matériaux et méthodologie expérimentale

Cette section présente les différents moyens qui ont été entrepris au cours du projet de recherche pour obtenir des résultats répondant aux objectifs définis au chapitre 1. Tel qu'il a été démontré dans le chapitre 3, l'écoulement de l'eau à travers les joints constitue le principal enjeu de dégradation des interfaces. La première étape de la période expérimentale a donc été de définir un programme d'essais dans lequel il serait possible d'effectuer la dégradation d'interface par écoulement accéléré (section 4.1). Il était également nécessaire d'obtenir un comparatif en temps réel pour ces dégradations. Une fois le programme expérimental défini, le choix des paramètres qui ont été modifiés durant l'expérimentation a dû être établi. Ces paramètres sont importants puisqu'ils encadrent l'évolution des dégradations durant l'expérience, soit le vieillissement. Une liste exhaustive des paramètres choisis ainsi que des explications entourant leur sélection est présentée à la section 4.2. Cette partie inclut également l'instrumentation d'essais ainsi que les conditions des expériences (pression, température, etc.).

Par la suite, le projet s'est orienté vers la conception d'éprouvettes et d'un montage de dégradation qui répondaient aux besoins techniques définis dans la section 4.2. Après itérations, un dimensionnement final répondant aux objectifs d'essais a été accepté. La méthode de fabrication complète ainsi que les choix de matériaux sont expliqués dans la section 4.3 (Dimensionnement et fabrication expérimentale). Étant donné que les éprouvettes sont considérées comme non-standard, il a également fallu entreprendre des démarches de dimensionnement pour un montage d'écoulement à conditions contrôlées. Ce montage inclut une instrumentation afin de recueillir des données durant la période d'essais. Une fois les cadres théoriques installés, il a été possible d'établir une procédure visant à recueillir un maximum d'informations utiles à la définition du phénomène de vieillissement. La section 4.4, évaluation des propriétés des matériaux, présente les différents essais effectués sur les matériaux dégradés ou non, afin d'obtenir des résultats nécessaires à la quantification ou à la qualification du vieillissement des injections cimentaires de coulis.

4.1. Programme expérimental

Le programme complet des essais d'écoulement est présenté par la figure 4.1. Il permet d'illustrer la principale division que prend l'étude par les deux types d'interfaces soit : les fissures dans le béton et les fractures rocheuses injectées au coulis cimentaire. Au total, il a été décidé que 22 éprouvettes d'interface béton-coulis (ou plutôt mortier-coulis) ainsi que 16 éprouvettes de roc-coulis étaient nécessaires pour le volet écoulement de ce projet. Le programme comprend au total 11 éprouvettes témoins ainsi que 27 éprouvettes dégradées selon différents intervalles de temps.

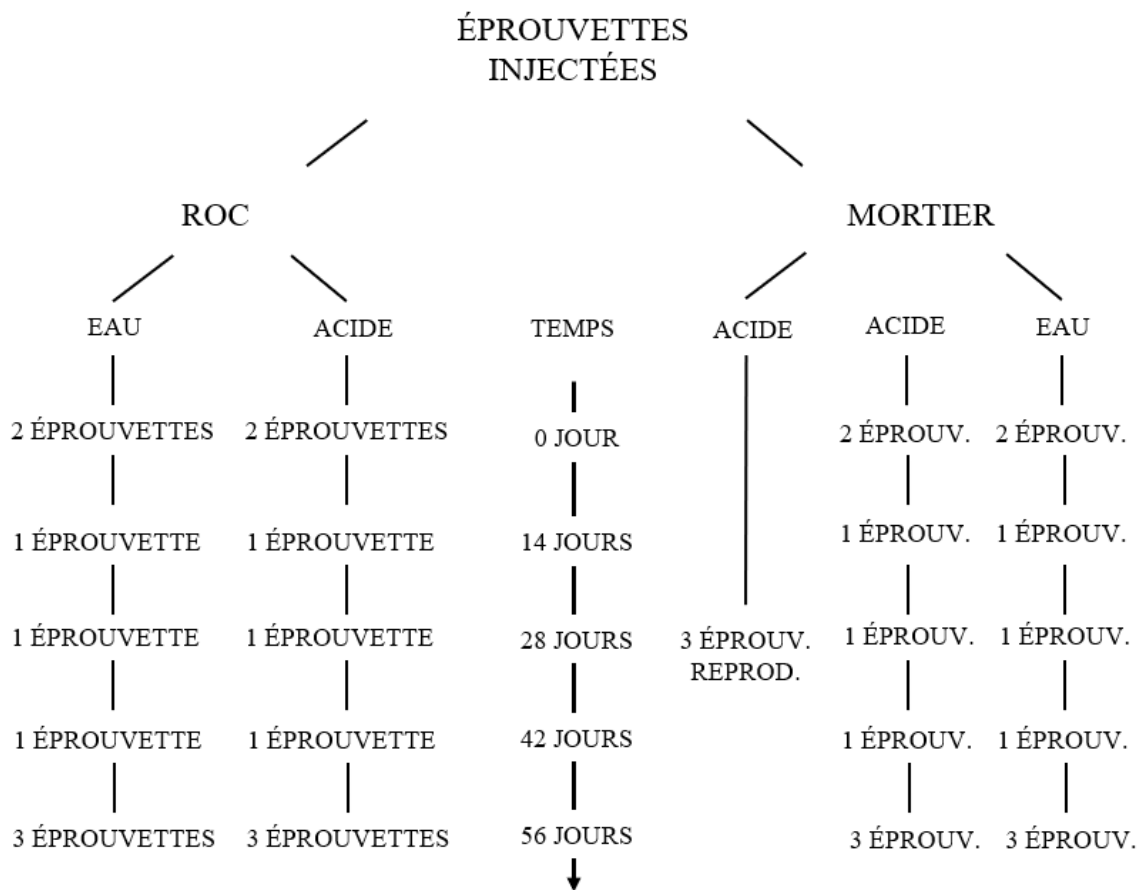


Figure 4.1 – Programme expérimental

Sur la période d'essais du montage d'écoulement de deux mois, certains échantillons avaient été retirés à différents intervalles afin d'évaluer l'évolution de la détérioration. Ces intervalles sont respectivement, 2 semaines, 4 semaines, 6 semaines et 8 semaines. Pour répondre aux besoins

de dégradation accélérée, deux montages devraient également fonctionner en parallèle (un à pH neutre et l'autre à pH 5). Afin de s'assurer une certaine validité dans les résultats, il est nécessaire d'évaluer les effets de l'acidité par rapport aux conditions réelles (pH neutre).

Par la suite, le programme expérimental se divise en cinq séries d'échantillons, deux pour la partie roc-coulis et trois pour la partie béton-coulis, il y a donc une série d'éprouvettes pour la dégradation acide et une pour la dégradation neutre, et ce pour chaque matériau. Cependant, il a été établi au début du projet qu'une série d'échantillons devait être réalisée afin de cerner la reproductibilité des éprouvettes soumises à la dégradation acide. De cette façon, il a été possible d'affirmer que les valeurs obtenues par un échantillon étaient suffisamment fiables sans, réduisant ainsi le nombre d'échantillons dégradés.

4.2. Paramètres, instrumentation et conditions au laboratoire

Cette sous-section présente les différents paramètres choisis qui ont été modifiés durant la période expérimentale ainsi que la collecte de données qui a été effectuée tout au long du processus de dégradation. Pour finir, une contextualisation des conditions de laboratoire dans lequel les éprouvettes ont été dégradées est présentée.

4.2.1. Le choix des paramètres

Tout d'abord, les paramètres utilisés pour le montage d'écoulement étaient **le pH** ainsi que **le temps d'exposition** des surfaces au milieu de détérioration. Ces deux paramètres ont été choisis puisqu'ils permettent dans un premier temps de situer la dégradation en temps réel (montage neutre) en la quantifiant/qualifiant et par la suite de la comparer avec la dégradation acide. Ils permettent également d'obtenir des résultats relativement rapidement. La figure 4.2 de la page suivante reprend le programme expérimental (figure 4.1) afin d'offrir un visuel sur l'ensemble des paramètres variables de l'étude. Il est important de noter que la vitesse, la pression ainsi que la température de l'écoulement ont été maintenues à des valeurs constantes dans cette étude.

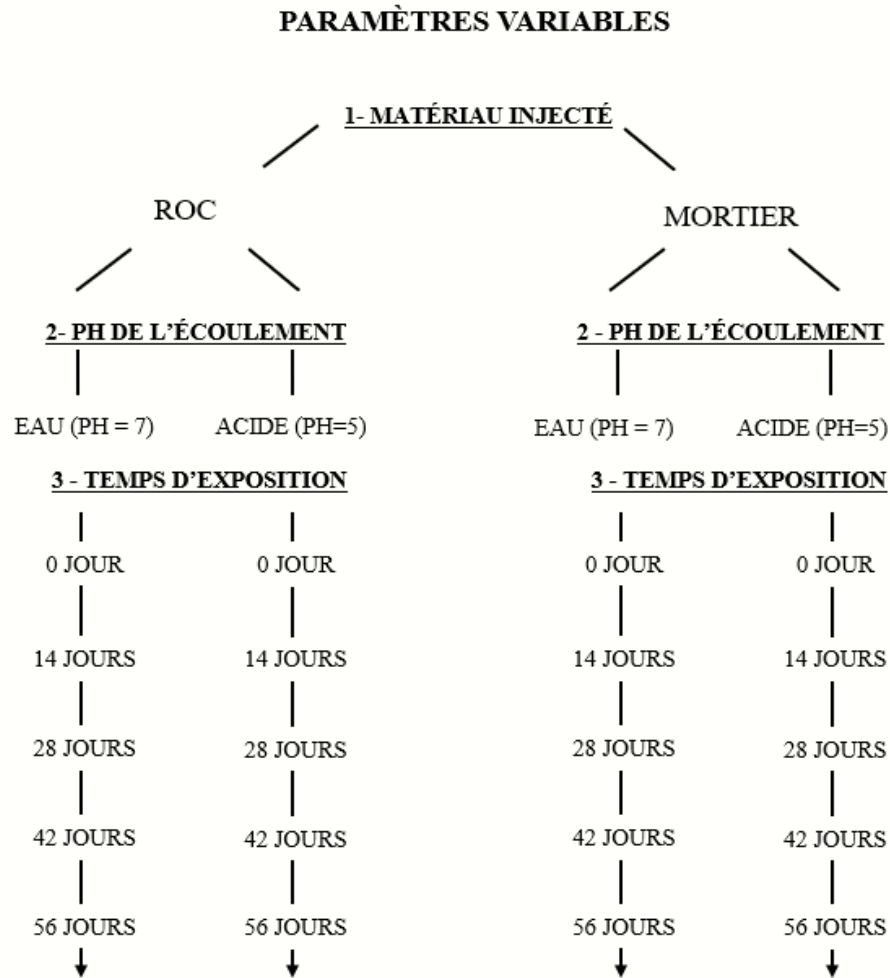


Figure 4.2 – Paramètres variables

La variation de pH a été effectuée grâce à deux montages d'écoulement identiques et indépendants pour chaque matériau (roc et mortier). L'un distribuait de l'eau de pH neutre (d'environ 7 à 8) à travers le réseau et l'autre montage distribuait écoulement acide (pH d'environ 5). De cette façon il a été possible de témoigner de l'efficacité de la dégradation des surfaces par écoulement acide ce a rendu possible :

- La justification du choix de la solution acide si les dégradations sont du même type;
- D'établir qu'à temps égal, la dégradation par l'écoulement acide accélère la détérioration des interfaces.

Le temps d'exposition à l'écoulement qui engendre une dégradation par dissolution chimique (pH) et par érosion mécanique (vitesse), est également un paramètre important du montage d'écoulement. En théorie, les échantillons soumis plus longtemps aux dégradations doivent présenter des endommagements d'interface plus conséquents. Suivant le programme d'essais établi à la sous-section 4.1, les échantillons ont été analysés suivant leur temps d'exposition respectif. Ce processus n'a pu être considéré comme valable seulement parce que résultats des essais de répétabilité des éprouvettes ont convergé vers des valeurs similaires. Les critères de comparaison ont été la variation de la masse, la résistance au cisaillement ainsi que leur variation de débit. La variation du temps d'exposition a entre autres permis :

- La quantification absolue, suivant les essais présentés à la sous-section 4.4, de la dégradation par rapport à un pas de temps donné;
- La détermination de la tendance (linéarité ou non) de la dégradation d'une surface.

4.2.2. Instrumentation durant les essais et conditions en laboratoire

Durant la période d'essais, l'instrumentation des montages a été nécessaire afin de contrôler les conditions de détérioration ainsi que d'obtenir des données pertinentes sur l'évolution des dégradations. Des manomètres ont été installés pour chaque échantillon afin d'assurer que la pression d'écoulement demeure constante pour toutes les éprouvettes. Ces instruments ont également permis la détection de micro-fuites dans le montage expérimental. Une pression de 20 kPa (environ) a été induite et maintenue dans chaque échantillon tout au long de l'expérimentation. Cette pression équivaut à une charge hydraulique d'une hauteur de deux mètres. Bien que la hauteur de certains bassins comme celui de Daniel-Johnson soit plus élevée, cette pression constitue un écoulement plein et constant. Cependant, il est important de noter que cette valeur demeure faible pour représenter les conditions des fondations rocheuses de ce barrage.

La température de l'eau a également été contrôlée tout au long du processus à l'aide d'un thermomètre au mercure traditionnel. Il est important de contrôler la température de l'écoulement bien que cet aspect peut être problématique. Selon les recherches effectuées, l'eau circulant dans les fissures, ou encore des bassins de barrages nordiques se situe entre 4 et 10 °C

ce qui est difficile à maintenir à moins de réfrigérer la pièce. Par conséquent, il a été décidé de seulement s'assurer que la température de l'écoulement demeure constante. Cette dernière était située autour de 31 à 33 °C. Engendrée par le dégagement de chaleur de la pompe submersible, la température peut augmenter la cinétique de dégradation par dissolution des surfaces [55]. Bien qu'elle soit élevée par rapport aux températures recensées dans les bassins nordiques, elle n'est pas assez élevée pour causer des dégradations supplémentaires au matériau du projet. Effectivement, la capacité thermique du béton ou du granite étant plutôt élevée (800-850) [56], la théorie d'Arrhenius¹⁶ ne s'applique pas pour des températures si faibles. La température de la pièce accueillant les montages était constante à 20 °C.

En ce qui a trait au contrôle du pH, il était effectué de façon quotidienne. L'utilisation d'un pH-mètre permettait de stabiliser les montages. Cependant, les deux montages ont nécessité des gestions différentes quant à la stabilisation des bassins. Le bassin acide devait présenter des valeurs se situant entre 4,95 et 5,05, sans quoi il était stabilisé à l'aide d'acide chlorhydrique. Il est important de noter que la dégradation des produits cimentaire engendre une augmentation de pH. La solution, présentée à la sous-section 4.3 était renouvelée aux deux semaines. Le bassin neutre devait quant à lui présenter un pH de 7 à 8. La solution aqueuse était tout simplement renouvelée lorsqu'elle atteignait une valeur supérieure à 8.

Pour finir, des échantillons de solution acide ont été prélevés à chaque stabilisation des bassins. Les échantillons ont été analysés à l'aide d'une ICP (spectrométrie à plasma à couplage inductif) où la concentration en ions des éléments suivants a été observée : Potassium, Calcium, Sodium, Chlore (stabilisation au HCl), silicium, magnésium et aluminium.

4.3. Dimensionnement et fabrication expérimentaux

Afin de répondre aux besoins engendrés par le contexte de dégradation (dégradation par écoulement confiné sur une surface rugueuse), il a été nécessaire de dimensionner un montage de dégradation ainsi que des éprouvettes pouvant fournir des résultats représentatifs. Le choix de la solution de dégradation est également présenté dans cette sous-section.

¹⁶ La loi d'Arrhenius définit que l'augmentation de la température engendre une augmentation de la dégradation [55].

4.3.1. Échantillons

Les objectifs auxquels le dimensionnement des échantillons devait répondre a été la première étape de la période de conception. Ces objectifs encadrent les fonctions minimales que les échantillons devaient posséder et elles ont été déterminées à la suite de la définition des paramètres expérimentaux et des conditions in situ des joints. Ces objectifs sont :

- La surface de détérioration doit être maximale;
- La rugosité de surface doit représenter celle d'un joint rocheux de granite;
- L'ouverture des joints doit être représentative d'un joint rocheux;
- L'échantillon doit être indépendant du réseau d'écoulement et doit s'y connecter facilement;
- Les matériaux utilisés doivent être similaires à ceux in situ;
- L'échantillon doit être étanche;
- L'échantillon doit résister à une pression de 100 kPa.

Suite à ces spécifications initiales, plusieurs concepts ont été créés afin de mener au dimensionnement final qui est présenté à la figure 4.3. Les spécifications précédentes ont, dans un premier temps permis d'obtenir une interface de propriété mécanique et de rugosité similaire aux joints rocheux de granite. La surface du joint soumis à l'écoulement était d'environ 95% de sa surface maximale et l'ouverture de la fissure était de 1 mm d'épaisseur. L'échantillon était étanche et pouvait résister à des pressions de plus de 200 kPa. Les matériaux choisis pour les échantillons béton-coulis étaient du Sika 212, un mortier prémélangé et standardisé au rapport E/C = 0,22. Pour le coulis de ciment, du ciment GU avec un rapport E/C = 0,5 a été employé. Bien qu'ils présentaient la même formule de coulis, le roc les échantillons de roc-coulis étaient composés de granite de Stanstead.

Comme le montre la figure 4.2, les échantillons étaient composés de quatre parties distinctes : la face supérieure et la face inférieure ont été fabriquées en mortier ou en roc, la couche centrale était composée de coulis cimentaire et aux quatre coins de l'échantillon, étaient installés des pièces

en plastique permettant de créer l'ouverture du joint de 1 mm. Le décollement des faces était situé au joint entre la face inférieure, de mortier ou de roc, et la face de coulis cimentaire.

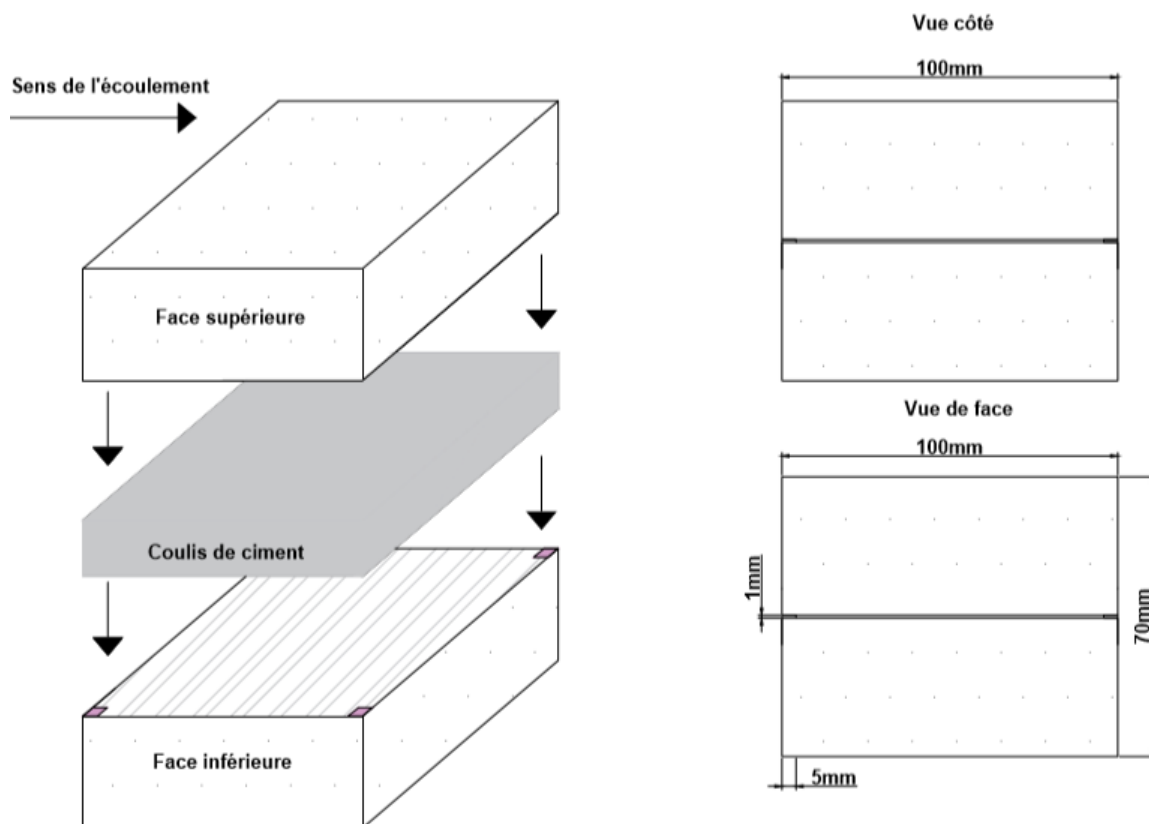
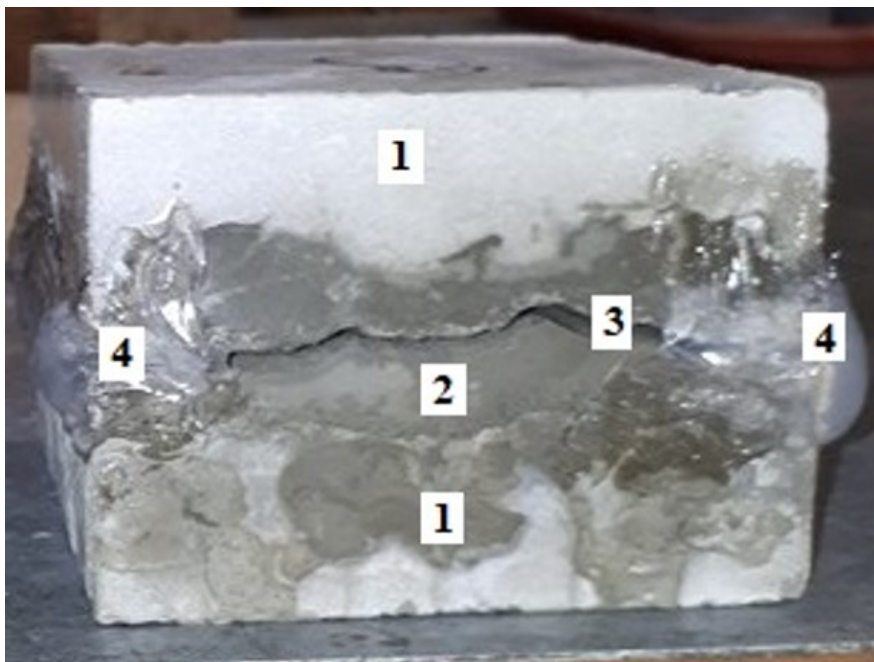


Figure 4.3 – Prototype d'échantillons final

Les dimensions des éprouvettes de béton et de granite étaient identiques afin de faciliter le montage et ainsi pouvoir comparer facilement les résultats. Les échantillons sont rectangulaires (100 x 100 x 70 mm). Ces dimensions ont été choisies puisqu'elles fournissent une surface suffisamment grande pour ainsi analyser correctement les détériorations à l'aide du microscope. Les profils de JRC selon Barton et Choubey 1977 [38] ont également été mesurés sur des profils de 10 cm, ce qui aide à justifier le choix initial concernant les dimensions.

Les **échantillons composés de mortier** ont été construits à l'aide de huit moules identiques. Les deux parties (parties inférieures et supérieures) ont été coulées séparément. Plusieurs impressions identiques ont été reproduites sur une bande de silicone à partir d'une fracture

rocheuse d'un granite. La rugosité de l'interface inférieure du mortier a donc été créée à partir de ces empreintes de silicone. Après un durcissement de 24h, les parties supérieures ont été fabriquées à l'aide de l'interface durcie de leur homologue. Encore une fois après 24h, le décolllement des couples d'interfaces a été réalisé et le coulis a pu être placé au centre pour joindre les deux parties. Finalement, après une troisième période de 24h le deuxième décolllement, entre le mortier et le coulis a été effectué. Par la suite, toutes les parties ont été placées dans une chambre humide pour une cure de sept jours. Une fois la cure terminée, l'assemblage pour le montage d'écoulement pouvait commencer (voir sous-section 4.3.2 afin d'obtenir les dimensions et spécificités des moules). Une bande de silicone a servi à étanchéiser les parties parallèles à l'écoulement ainsi le pourtour de la fissure sur la partie perpendiculaire à l'écoulement. Le résultat final est exposé par la figure 4.4.



- 1- Mortier (ou roc)
- 2- Coulis de ciment
- 3- Joint (1-1.5 mm)
- 4- Silicone

Figure 4.4 – Échantillon mortier-coulis avant d'être inséré dans le boîtier de dégradation

Les **échantillons de granite** ont été taillés avec les dimensions voulues et fracturés au centre afin d'obtenir une interface sans aucune dégradation. Cette fracture représente potentiellement la seule variabilité entre les éprouvettes de roc. Par la suite, la partie inférieure était installée à l'intérieur d'un moule étanche. Le mélange de coulis de ciment était injecté entre les deux faces de granite. La partie supérieure était ensuite installée afin de fermer l'éprouvette. Après 24 heures, la partie supérieure était retirée pour créer un décolllement afin d'y insérer les quatre

pièces en plastique. Les éprouvettes étaient transférées en chambre de cure pour sept jours. Globalement, les échantillons roc-coulis étaient similaires aux échantillons mortier-coulis (figure 4.4). Chaque série de construction est composée de huit éprouvettes, soit deux témoins et six échantillons qui ont été dégradés.

L'étape suivante à la construction matérielle des échantillons était de les installer dans un boîtier de dégradation. **Les boîtiers de dégradation** avaient pour objectif d'étanchéifier les échantillons en plus de pouvoir les connecter facilement au réseau d'écoulement. **Les plans des boîtiers sont présentés à la page A1 de l'annexe.** Les dimensions intérieures des boîtiers étaient identiques aux échantillons suivant le sens de l'écoulement et légèrement supérieurs dans le sens perpendiculaire afin de laisser un peu d'espace au silicone. Les boîtiers étaient divisés en quatre parties : deux parties identiques perpendiculaires et deux parties identiques parallèles à l'écoulement.

- Où les parties perpendiculaires possèdent une ouverture circulaire permettant la circulation du fluide à travers le boîtier. Une cavité au centre venait épouser l'ouverture du joint pour y distribuer l'écoulement et diminuer le facteur d'impact de l'écoulement à l'entrée de l'échantillon. Un connecteur était également encastré à chaque bout afin de créer la connexion. Le silicone aidait également la direction de l'écoulement à travers les éprouvettes, il était ainsi possible d'en augmenter la pression induite;
- Les parties parallèles à l'écoulement venaient simplement s'insérer dans le boîtier et elles permettaient au silicone de rester en place;
- Une fois les quatre parties en place, des boulons étaient installés pour stabiliser le boîtier. Autrement dit, moules en PVC englobait les échantillons qui pouvait être facilement connectés au montage.

Chacune des éprouvettes nécessitait son propre moule d'essais, par conséquent la construction de douze moules d'étanchéisation a été nécessaire. Au minimum un total de 14 jours a été nécessaire à la fabrication d'une série (quatre pour la préparation de la coulée du mortier et du coulis, sept de cure et trois pour la mise en place du silicone). La figure 4.5 offre un visuel sur un échantillon dans son boîtier de dégradation qui est connecté au système de dégradation.

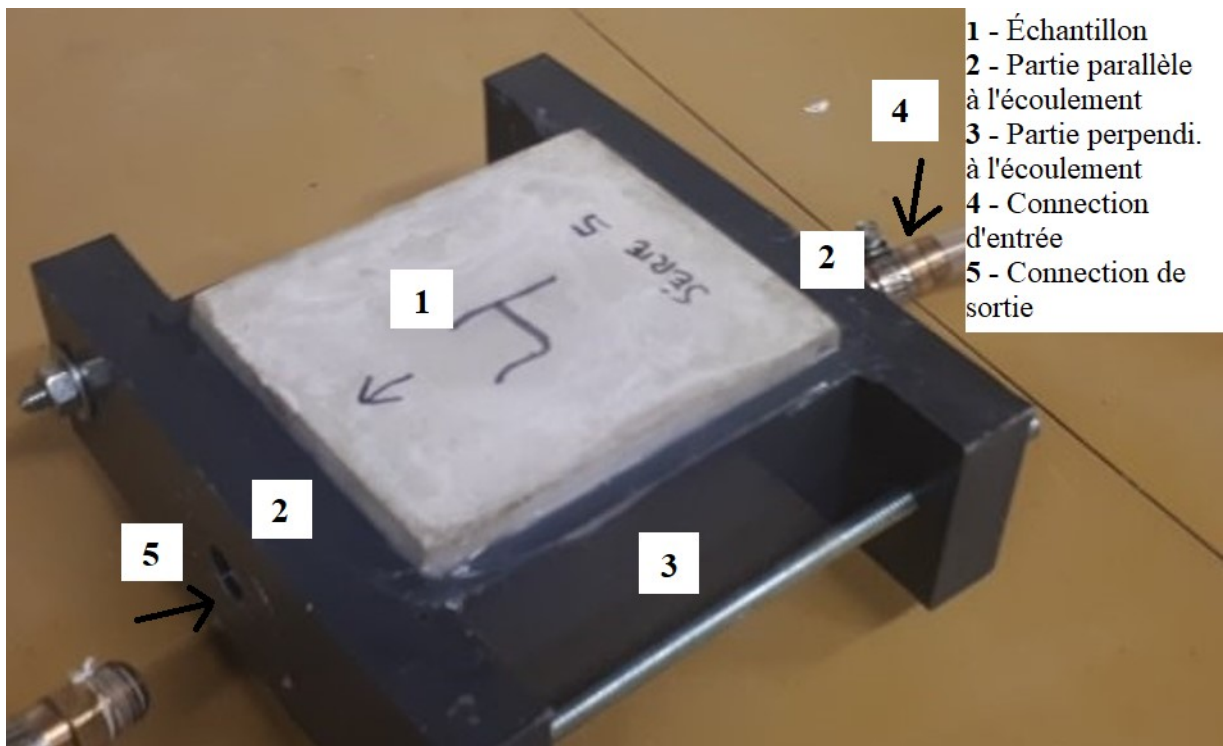


Figure 4.5 – Un échantillon dans son boîtier de dégradation

4.3.2. Montage de dégradation

La définition des objectifs auxquels le dimensionnement du montage de dégradation devait répondre a été la deuxième étape de la période de conception. Ces objectifs font suite aux caractéristiques des éprouvettes suivant la période de conception des échantillons. Ces objectifs pour le montage sont :

- La connexion avec les échantillons doit être simple;
- Le montage doit être étanche;
- Le montage doit résister à une pression d'au moins 200 kPa;
- Le montage doit pouvoir fonctionner en continu durant 2 mois;
- Le montage doit résister au fluide corrosif déterminé dans la section 4.3.3;
- Le fluide doit être en recirculation continue dans le montage.

Suite à ces spécifications, le concept présenté par la figure 4.4 a été créé. Les spécifications précédentes ont été respectées dans l'ensemble. Le montage de dégradation était étanche jusqu'à une pression de 200 kPa (pression maximale testée). Le montage a également été suffisamment résistant pour contenir l'écoulement durant deux périodes de deux mois.

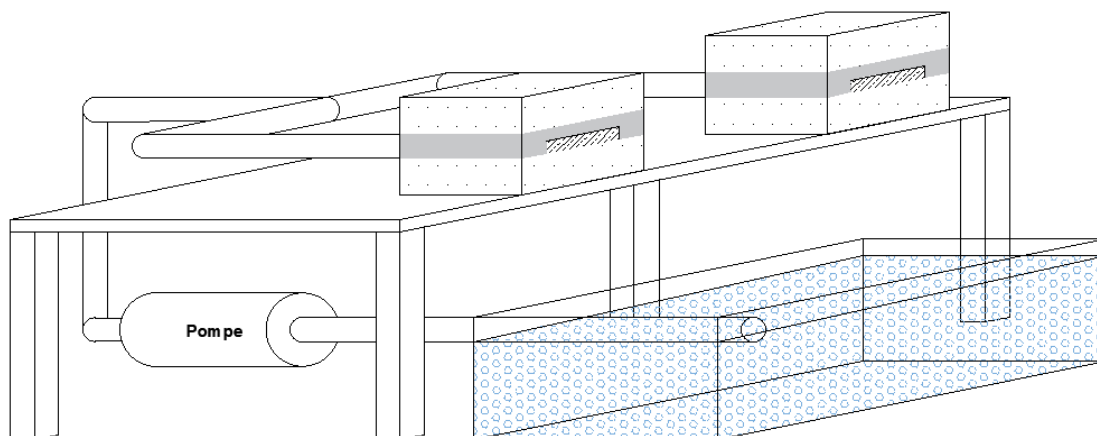


Figure 4.6 – Montage de dégradation conceptuel

Le concept initial du montage d'écoulement est illustré par la figure 4.4. Il s'agit d'un montage à circuit fermé afin de respecter l'environnement et de contrôler plus aisément le pH et la température de l'écoulement. L'eau a été entreposée dans un bassin placé sous une table. Une pompe submersible acheminait la solution aqueuse dans un tuyau pouvant à la fois diriger l'écoulement vers les échantillons ou simplement le rediriger dans le bassin. Par la suite, l'écoulement se divisait en six branches afin de distribuer de l'eau aux six éprouvettes simultanément. Des manomètres ont été installés à l'entrée de chaque échantillon afin d'en contrôler la pression d'entrée. Les éprouvettes ont été connectées au montage par leur moule à l'aide d'un système de tuyauterie en PVC et en étain. Une fois que la solution avait traversé les éprouvettes, elle était réacheminée dans le bassin à l'aide de tube malléable qui était connecté à la sortie. Les produits issus de la dégradation (composés cimentaires du coulis et du mortier) des interfaces étaient sous forme ionique, c'est-à-dire trop petite pour causer les moindres dommages aux pompes ou encore pour bloquer les artères des montages.

Au début de chaque lancement d'une série d'essais, le montage a été suivi plus régulièrement puisque les variations de température et de pH qui étaient plus grandes (deux fois par jour pour

ensuite diminuer à une fois par jour). Les mouvements des échantillons étaient nuls, car les éprouvettes ont été installées de sorte qu'elles ne puissent pas bouger. Il est important de se rappeler que deux montages étaient identiques et ils ont été fabriqués avec les mêmes matériaux. La seule différence se situe au niveau des fluides qu'ils faisaient circuler, un distribuait un fluide neutre et l'autre avec un pH acide, afin de comparer la détérioration entraînée par un écoulement acide. La figure 4.5 offre un visuel sur le résultat final du montage de dégradation, qui au final, n'est qu'un simple montage de redistribution d'écoulement.

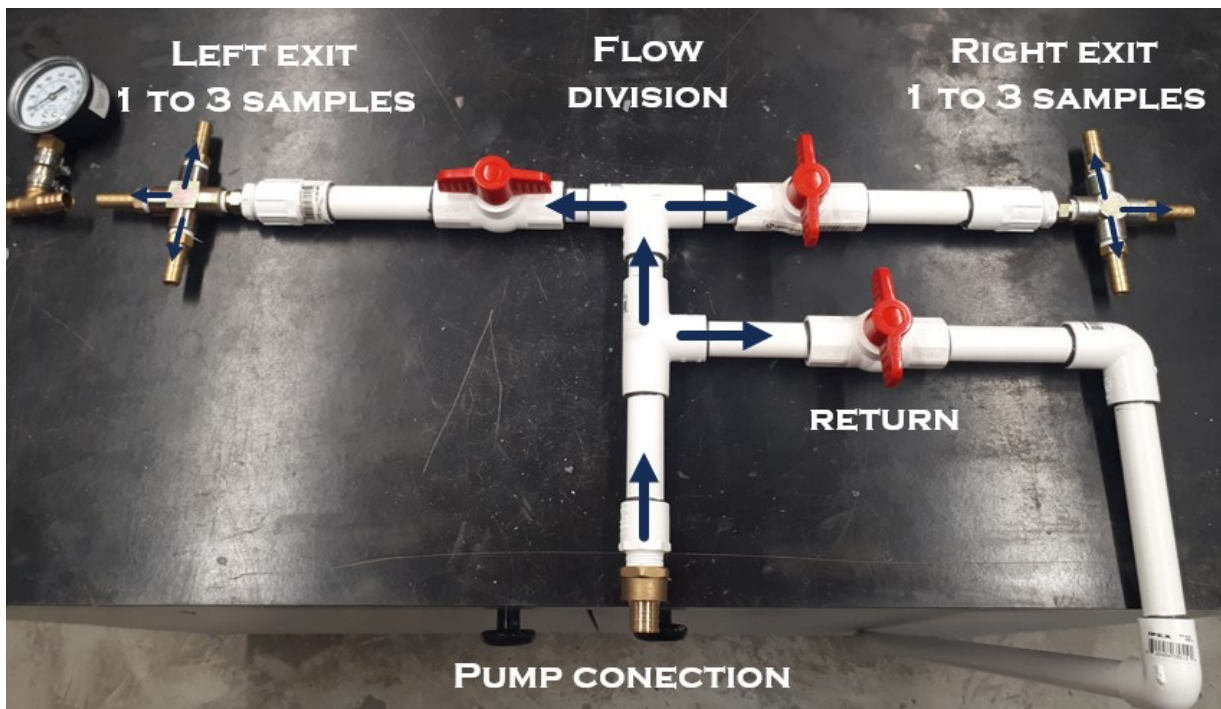


Figure 4.7 – Montage de dégradation réel

4.3.3. Écoulement

Les essais d'écoulement se sont poursuivis sur une période de près de 8 mois (reproductibilité 2 mois, mortier 2 mois, roc 2 mois, période de construction 2 mois). Durant la période de dégradation des éprouvettes de mortier et de roc, les montages fonctionnaient sans arrêt simultanément distribuant respectivement de l'eau et de l'acide. Le suivi de l'écoulement est présenté aux pages 1 à 5 de l'annexe B. Cette sous-section présente les caractéristiques des deux liquides.

La dégradation des surfaces par l'eau est nécessaire au projet puisqu'elle établit les bases de la dégradation réelle. Par conséquent, il est nécessaire d'obtenir un liquide aux composantes similaires. L'eau des bassins de barrages nordiques se situe à un pH variant de 6 à 8 [57]. De plus, elle est chimiquement similaire à l'eau potable qui est distribuée par les réseaux d'eau des municipalités québécoises. Par conséquent, il a été choisi que l'eau du robinet (pH 7,0 à 7,2) de la ville de Sherbrooke était représentative. Lorsque l'eau en recirculation continue dans le montage atteignait des valeurs de pH supérieures à 8 à cause de la dégradation d'interface, elle était tout simplement remplacée. La dégradation des surfaces à l'aide de solution acide constitue l'élément clé du projet étant donné qu'elle permet d'engendrer un vieillissement d'interface aux interfaces de façon accélérer. Les produits cimentaires étant très sensibles aux variations de pH, il a été décidé de dégrader les interfaces avec une solution de pH = 5. Cette solution est constituée de deux sels formant une solution tampon qui permet d'absorber le flux d'ions apportés par les premiers jours de dégradation. La solution était composée d'acide citrique ainsi que de phosphate de sodium. Le tableau 4.1 présente les proportions utilisées dans le cadre de cette étude. À noter que cette solution a été choisie, car elle était peu susceptible d'engendrer des phénomènes de dégradation supplémentaires à la dissolution. La solution était renouvelée tous les 14 jours.

Tableau 4.1 – Quantité des différents éléments pour produire 10 litres de solution acide

Élément	Quantité	Unité
Eau	10	litres
Acide citrique	90	grammes
Phosphate de sodium	183	grammes

4.4. Évaluation des propriétés des matériaux

La plupart des résultats obtenus dans le cadre de cette étude ont été obtenus après la période de dégradation dans les montages. Étant donné que l'objectif est de travailler aux comparaisons quantitatives des interfaces dégradées, il faut d'abord que ces dernières aient subi un certain vieillissement. Le phénomène a donc été quantifié à l'aide d'essais de résistance au cisaillement, de numérisation de rugosité avant et après les essais, ainsi que par microscope électronique à balayage. La qualité des produits cimentaires a également été validée grâce à des mesures de compression à la compression.

4.4.1. Ordre et choix des essais après détérioration

Bien que chaque interface ait été pesée et scannée avant l'étape de la dégradation, les résultats n'ont été obtenus qu'une fois la période de détérioration respective terminée. La première étape a été de comparer la masse des éprouvettes après la détérioration pour évaluer la perte de coulis. Cette étape a été effectuée sur tous les échantillons, cependant elle ne constitue pas des résultats valables puisque la masse est fortement influencée par la présence d'eau dans les éprouvettes qui ne cessent de sécher. Par conséquent, ces résultats, qui sont exposés aux pages 6 à 8 de l'annexe B, n'ont été considérés que pour la série de reproductibilité.

La seconde étape après détérioration consistait à numériser l'interface dégradée. Par conséquent, l'échantillon devait être sorti de son boîtier de dégradation pour qu'il soit possible d'utiliser le profilomètre laser Kreon Zéphyr 25. Cette étape permettra de comparer les rugosités des interfaces avant la détérioration (les échantillons auront tous la même interface de départ) avec la rugosité ayant un subit un écoulement majoritairement érosif ou plutôt axé sur la dissolution. Cette étape a été faite sur tous les échantillons dégradés de roc et de béton qu'ils aient été deux semaines ou 3 mois dans le montage. À noter que cette étape se répétait une fois que les joints avaient été cisailés.

La troisième étape consistait à évaluer la résistance au cisaillement des interfaces par cisaillement direct. Cette étape permettra de mettre une valeur sur la résistance au cisaillement des joints dégradés en plus de les comparer avec les joints intacts selon le modèle de Mohr-Coulomb. Il est important de noter que tous les échantillons ont été testés de la même façon. La dernière étape était l'analyse de la chimie des interfaces détériorées. Cette partie a permis d'analyser les types de dégradations engendrer par l'acide. En d'autres termes, elle a permis de voir si des anomalies étaient présentes sur l'interface les éprouvettes, ce qui aurait pu remettre en doute l'utilisation de certaines données ou l'utilisation de cette solution. Cette étape a également permis de valider un doute initial quant à la possibilité de régénération du coulis par la solution aqueuse.

4.4.2. Résistance à la compression uniaxiale

Six cubes de dimensions 50 x 50 mm ont été fabriqués avec les surplus de matériel pour chaque partie cimentaire des échantillons (mortier inférieur et supérieur et coulis de ciment). Au total, 36 cubes de mortier ainsi que 30 cubes de coulis de ciment ont été testés selon la norme ASTM C109-13 [58]. L'objectif était de témoigner de la qualité initiale des matériaux (après 7 jours de cure) mais aussi de valider, à l'aide des résultats de 28 jours, les suppositions de départ quant à l'utilisation des surfaces après seulement 7 jours de cure. Un faible gain en résistance a été observé durant cette période, ce qui signifie que les suppositions sont justifiables. La figure 4.6 établit la variation de la résistance à la compression d'un groupe de résultats représentatif pour des essais effectués sur du coulis de ciment et sur du mortier (Sika 212).

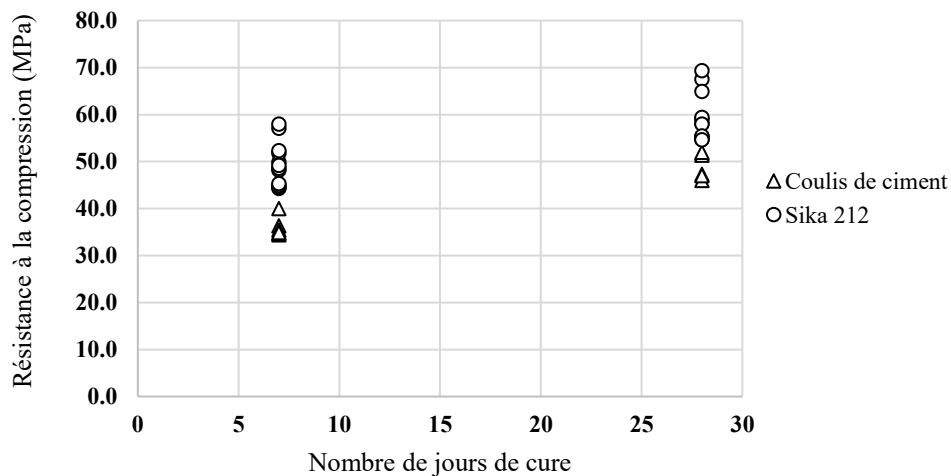


Figure 4.8 – Résultats de compression selon ASTM C109-13

Il est possible de voir à l'aide de la figure 4.6 que les résistances des deux matériaux utilisés sont d'environ 40 MPa pour le coulis et de 52 MPa pour le mortier après 7 jours. La résistance à la compression des deux matériaux après 28 jours se situe autour de 50 MPa pour le coulis et de 65 MPa pour le mortier. Par conséquent, il est possible d'affirmer que la résistance utilisée pour les essais de dégradation (7 jours) est supérieure à celle des bétons (environ 30 à 35 MPa) et supérieure à celle des coulis de ciment que l'on retrouve généralement dans un contexte hydroélectrique, ce qui justifie la supposition initiale (utilisation des surfaces après seulement 7 jours de cure). De plus, la formule de coulis de ciment choisie représente bien celle utilisée pour les voiles d'injections et les réparations de joints. La résistance à la compression observée en

laboratoire est probablement supérieure aux valeurs retrouvées in situ puisque les techniques d'injection ne favorisent pas un mélange complet du ciment et de l'eau. Il est toutefois difficile d'échantillonner les coulis d'injections pour obtenir des valeurs de résistance à la compression représentatives. À noter que la totalité des résultats de résistance à la compression peut être retrouvée aux pages 9 à 12 de l'annexe B.

4.4.3. Rugosité de surface, numérisation et JRC

L'obtention de la rugosité de surface est un élément essentiel pour analyser l'évolution de la dégradation d'une discontinuité. Cette sous-section présente les manipulations effectuées en laboratoire ainsi que le traitement de données réalisé à l'aide de Matlab pour finalement obtenir les variations de JRC. Afin d'obtenir une reconstitution en 3D de la rugosité d'interface, il a été nécessaire d'utiliser un profilomètre laser Kréon© Zéphyr 25. La résolution de l'appareil est de 72 μm pour les composantes horizontales (x,y) et de 3 μm pour la composante verticale (z) et elle permet d'enregistrer près de 6 millions de points par surface. Le profilomètre se divise en deux parties (figure 4.7) : un dispositif de mesure ainsi qu'un bras articulé. Le dispositif de mesure envoie un faisceau lumineux sur la surface à reproduire numériquement. La lumière est réfléchiée et captée par l'appareil ce qui lui permet de calculer la distance et de produire un profil 3D de la surface. L'étape de numérisation des surfaces survenait à trois moments lors du protocole expérimental, et ce pour chaque série d'échantillons. La première numérisation était effectuée 24 heures après la cure de 7 jours.

La deuxième numérisation survenait une semaine après la dégradation d'un échantillon et la troisième était effectuée directement après le cisaillement des aspérités d'interfaces. Une fois les interfaces numérisées et traduites en fichier texte, il a été possible d'utiliser le logiciel Matlab pour obtenir les paramètres statistiques de la rugosité (sous-section 2.5) grâce à une fonction développée par Rullière et al. 2018 qui s'appuie sur des équations statistiques de la rugosité. Toute la théorie propre au développement de ces équations peut être retrouvée dans l'article [59].

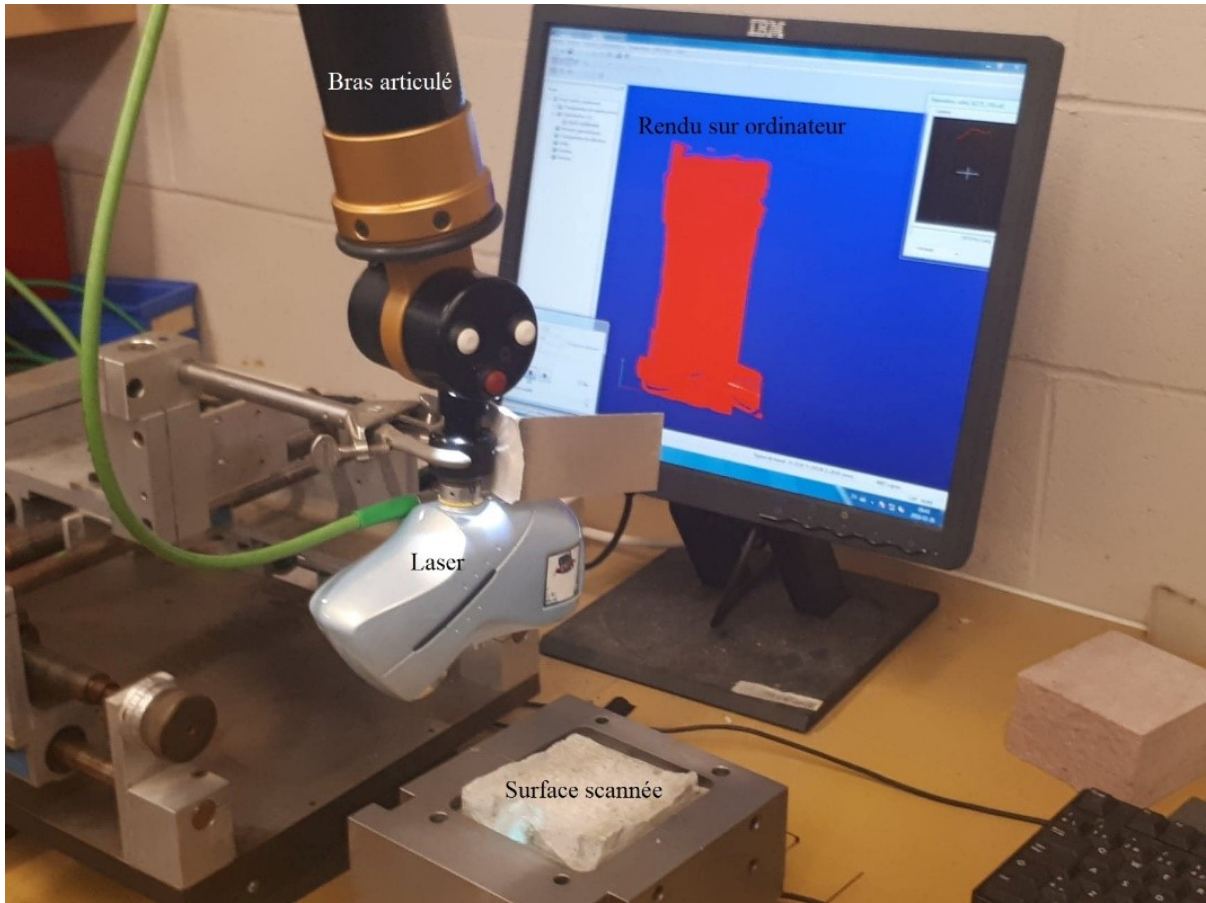


Figure 4.9 – Profilomètre laser Kréon© Zéphyr 25 [31]

Cette fonction Matlab effectue tout d'abord un maillage à l'aide des coordonnées spéciales fournies dans le fichier texte. Il est important de noter que la fonction a été programmée pour un pas de résolution de 0,5 mm. Par la suite, le logiciel effectue une coupe subjective des côtés. Une coupe 5 mm sur tous les côtés a été effectuée afin d'éliminer les traces laissées par le silicone et les pièces de plastique sur les échantillons.

Une fois la coupe terminée, la fonction crée des profilés moyens longitudinaux similaires à ceux de Barton et Choubey qui sont finalement regroupés ensemble pour produire une valeur de JRC. Le tableau 4.2 présente les valeurs des différents paramètres statistiques sortant du programme Matlab.

Tableau 4.2 – Paramètres statistiques d’une surface calculés à l’aide de Matlab

Nombre de profils : 161			Coupe : 5 mm		Maillage : 0,5 mm	
Paramètres	Valeur	Écart-type	Paramètres	Valeur	Écart-type	
JRC	14,6	1,2	Sf	0,021	0,003	
CLA (mm)	3,6	0,9	Z2	0,29	0,02	
ETE (mm)	7,0	-	Z3	0,19	0,02	
RMS (mm)	3,8	-	Z4	-0,07	0,05	
Rp	1,04	0,01	-	-	-	

Le tableau 4.2 montre un profil typique utilisé dans cette étude, c’est-à-dire une valeur de JRC d’environ 14 et une amplitude moyenne des aspérités de 4 mm. La figure 4.8 illustre un visuel issu de Matlab. La rugosité peut sembler élevée sur cette image puisque le facteur d’échelle de l’axe vertical est dix fois plus élevé que celui horizontal.

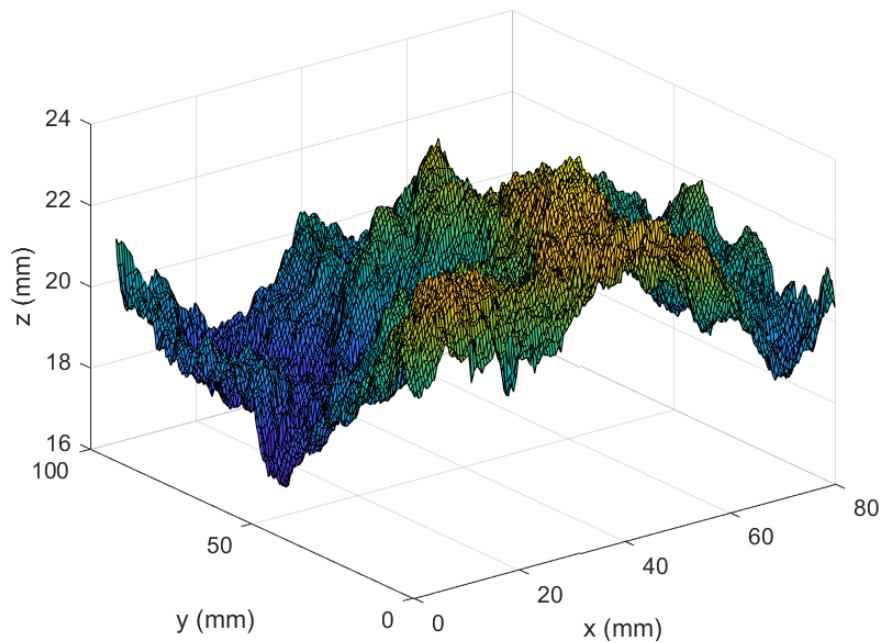


Figure 4.10 – Profil sortant du programme Matlab

4.4.4. Essais de cisaillement direct

L'essai de cisaillement direct a été utilisé dans le cadre de cette étude afin de quantifier. Les essais effectués dans le cadre de cette étude suivent les directives de la norme ASTM D5607-02 [60] qui sont illustrées à la figure 4.9. Un bâti de cisaillement développé à l'Université de Sherbrooke, dont l'ensemble des caractéristiques peut être retrouvé dans plusieurs ouvrages [28,29,41], a été utilisé pour les essais de cisaillement.

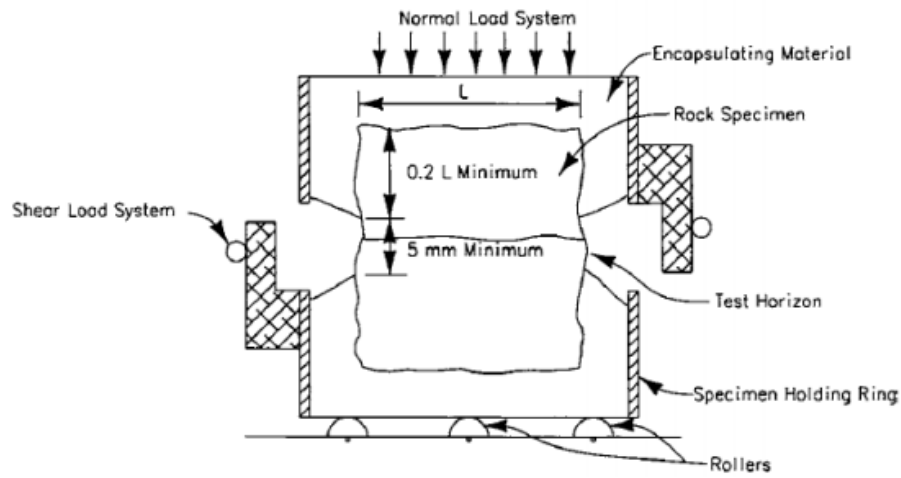


Figure 4.11 – Montage de cisaillement selon ASTM D5607-02 [60]

Pour cette étude, des contraintes normales de 0,1, 0,2 et 0,3 MPa ont été appliquées pour chaque éprouvette. Les faibles valeurs incluses dans ce domaine contraint ont été choisies, car elles permettent de minimiser la destruction de l'état de surface durant l'essai. Cet aspect est très important étant donné que trois essais de cisaillement ont été effectués par échantillon et que dans la plupart des cas, les éprouvettes présentent des surfaces dégradées.

Pour cette étude, le taux de déplacement utilisé était de 0,1 mm/min jusqu'à un déplacement total de 3 mm à moins d'un bris quelconque de la surface cisailée. La figure 4.10 de la page suivante illustre les résultats de trois essais au cisaillement obtenus sur un témoin (non dégradé). Ces résultats peuvent également fournir une enveloppe de rupture de Mohr-Coulomb.

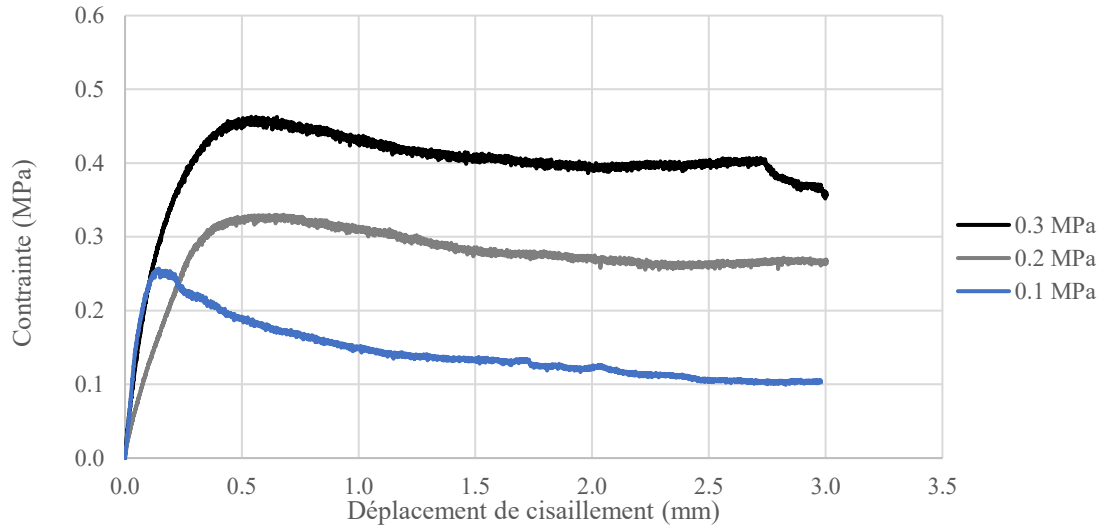


Figure 4.12 – Résultats de résistance lors d’essais de cisaillement sur un témoin

La figure 4.10, indique entre autres que le choix d’effectuer les essais à de faibles contraintes normales permet de distinguer une rupture partielle (non complète) des aspérités. On peut le voir par exemple sur les courbes d’essai à 0,2 et 0,3 MPa qui affichent une certaine résistance au pic. La figure 4.11 affiche les résultats de dilatance par rapport aux mêmes essais (témoins à 0,1, 0,2 et 0,3 MPa). Il est possible de voir une perte de dilatance avec l’augmentation du nombre d’essais de cisaillement effectué. Cette diminution concorde entre autres avec la rupture au cisaillement des aspérités effectuée une première fois lors de l’essai à 0,1 MPa et une seconde fois avec l’essai à 0,2 MPa. La diminution semble cependant s’atténuer avec le nombre d’essais effectués.

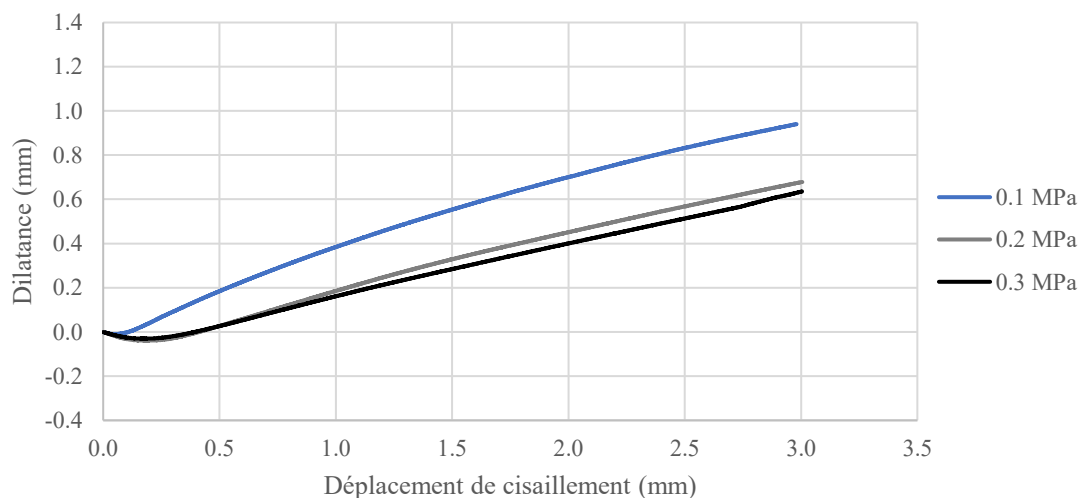


Figure 4.13 – Résultats de dilatance lors d’essais de cisaillement sur un témoin

4.4.5. MEB, Microscope à Balayage Électronique

Afin de valider les suppositions initiales, quant à savoir si la dissolution et l'érosion étaient les deux types de dégradations principales causées par l'écoulement de l'eau sur les surfaces, trois types d'essais ont été employés.

Premièrement, le MEB a été employé pour analyser l'évolution de la dégradation sur les trois matériaux utilisés. Une cartographie des éléments en place a été faite pour les interfaces détériorées durant 0, 14, 28 et 56 jours. Chaque échantillon analysé a également été soumis à une vérification visuelle sur une majeure partie de la surface afin d'observer les principaux types de dégradations occasionnées sur les interfaces. Des clichés ont été relevés à un grossissement de 250, 500, 1000 et 3000. Les résultats entourant l'investigation des phénomènes de dégradation par MEB sont présentés à la sous-section 5.1.

4.4.6. ICP, Spectrométrie à plasma à couplage inductif

Deuxièmement, une ICP (Spectrométrie à plasma à couplage inductif) a été effectuée sur une sélection d'échantillons prélevés dans le bassin de solution acide afin d'obtenir un suivi de l'évolution la dégradation des éprouvettes tout au long du processus.

Le suivi des ions présents dans l'écoulement s'est réalisé à l'aide de l'ICP qui a été effectué uniquement sur les prélèvements de la solution acide. L'ICP permet de détecter la concentration en ions d'éléments (surtout métalliques) en ionisant les échantillons au moyen d'une torche au plasma. Pour cette étude, chaque série de dégradation acide a été divisée en quatre sous-groupes de deux semaines (période à laquelle la solution était renouvelée). À l'intérieur de ces sous-groupes, cinq échantillons ont été analysés suivant le modèle ci-présent : T₀, T₁, T₇ et T₁₄ par rapport à l'âge de la solution. La concentration des ions a été analysée par rapport aux éléments identifiés préalablement comme potentiellement néfastes (dégradation non souhaitée) ou encore rapport aux éléments composant les surfaces, où leur présence en solution est synonyme de dégradation. Ces éléments sont les suivants : Potassium, Calcium, Silicium, Magnésium, Aluminium, Sodium. Une partie des résultats obtenus sont présentés à la sous-section 5.2

4.4.7. DRX, Cristallographie aux Rayons X

Le troisième essai à avoir été effectuée sur le recensement des types de détérioration était la DRX. Nécessaire à la validation des suppositions initiales, la DRX (Cristallographie aux rayons X) a été effectuée uniquement sur le dépôt d'interface dégradé à l'acide durant 56 jours qui émanent certains doutes quant à la présence d'une dégradation différente à la dissolution ou à l'érosion. Ce dépôt survenait après le séchage des interfaces. Les résultats issus de la DRX sont présentés à la sous-section 5.2.

5. Résultats et interprétations

Ce chapitre inclut tous les types des résultats nécessaires pour analyser les dégradations d'interfaces survenues au cours de cette étude. Les résultats issus du MEB, de la DRX, de l'ICP, de l'évolution rugosité d'interface par profilomètre laser ainsi que des essais de cisaillement direct sont exposés, et ce pour les détériorations neutre et acide de chaque matériau.

5.1. Analyse au MEB

Les résultats issus du MEB ont été triés de sorte à alléger le document en ne présentant seulement que :

- Les comparatifs évolutifs de la dégradation neutre et acide;
- L'évolution des éléments présents à la surface de certaines dégradations;
- Les anomalies ou caractéristiques spécifiques des interfaces.

Il est également important de noter que l'investigation a été effectuée sur les dégradations de 0, 14, 28 et 56 jours pour les interfaces de coulis cimentaire. Seules les interfaces dégradées durant 0 et 56 jours ont été analysées pour le mortier et pour le roc. La figure 5.1 montre le dépôt de calcite que l'on pouvait retrouver sur les surfaces non dégradées.

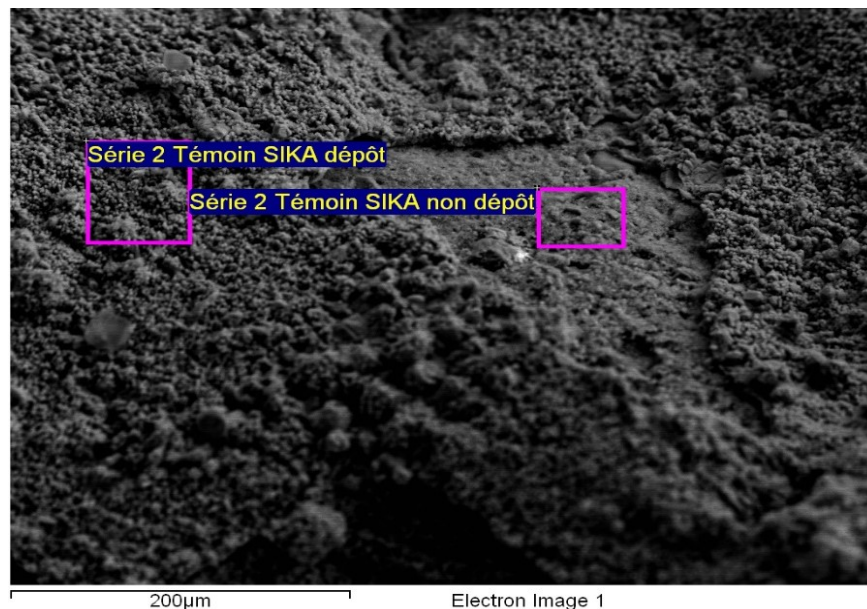


Figure 5.1 – Surface d'un joint cimentaire analysé au MEB

À noter que le même type de dépôt était également présent sur les interfaces de coulis cimentaire. La figure 5.2 illustre la composition chimique des deux zones analysées (surface de mortier et dépôt). Il semblerait que le dépôt soit majoritairement composé d'oxyde de calcium, qui en réagissant avec le gaz carbonique présent dans une solution ou dans l'atmosphère, contribue à l'apparition de carbonate de calcium. Il est que fréquent qu'un dépôt de calcite s'incruste sur les surfaces de matériaux cimentaires, notamment lors de la période de cure humide. Par conséquent, ce dépôt initialement présent sur les surfaces ne constitue rien d'anormal.

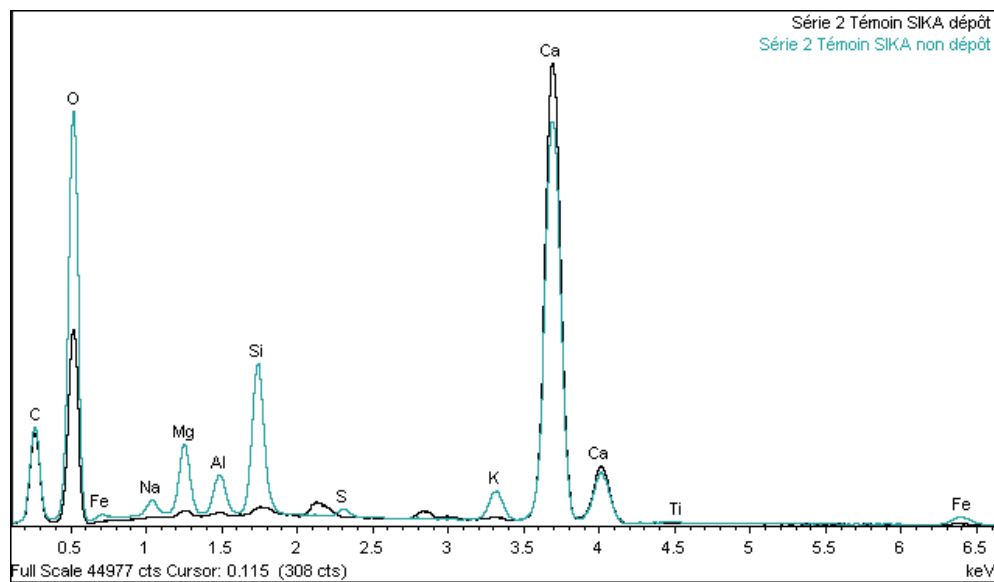


Figure 5.2 – Composition chimique de la surface et du dépôt analysé

5.1.1. La dégradation du coulis de ciment

Globalement les interfaces de coulis de ciment non dégradés présentaient toutes des caractéristiques similaires, c'est-à-dire, une fine couche de carbonate de calcium recouvrant environ 90% la surface des échantillons. Les zones exposant le matériau cimentaire étaient majoritairement composées de silice (des grains non recouverts). La figure 5.3 la page suivante offre un visuel d'une portion de la surface d'une éprouvette de coulis de ciment non dégradée. On peut y voir un grand nombre de cristaux composés de calcium qui amorcent leur cristallisation. La globalité de l'échantillon est cependant constituée de pâte cimentaire dévoilant parfois

quelques grains sable. À noter que tous les résultats présentés dans cette sous-section ont été obtenus à un grossissement de 250x.

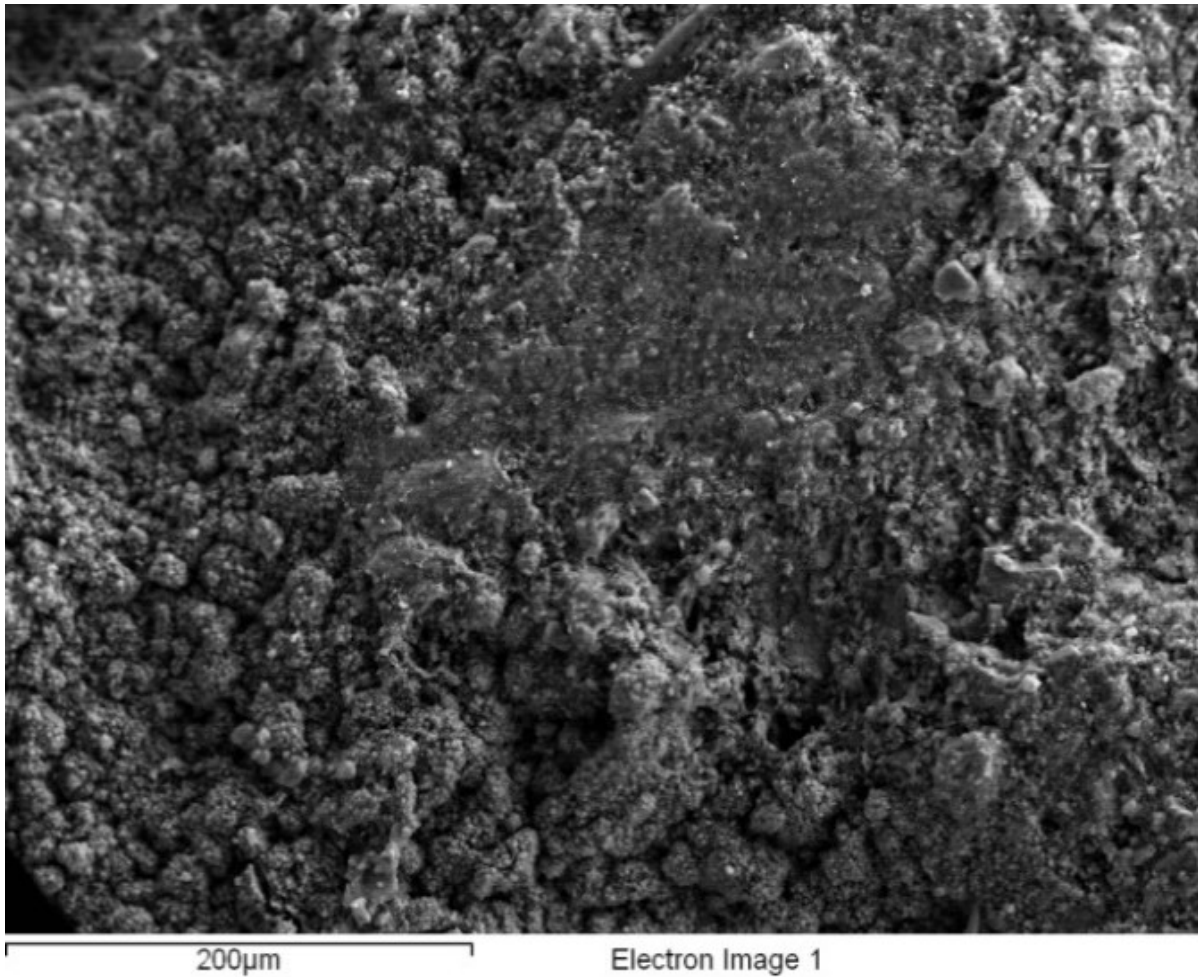


Figure 5.3 – Interface de coulis cimentaire non dégradé

Suivant la dégradation des interfaces par écoulement, il est possible d’observer des changements visuels plus évidents des surfaces. La figure 5.4 montre la dégradation d’interface de coulis par écoulement neutre pour des intervalles de temps allant de 0 à 56 jours. Les zones exposées possèdent toutes des dimensions identiques de 0,5 mm x 0,5 mm.

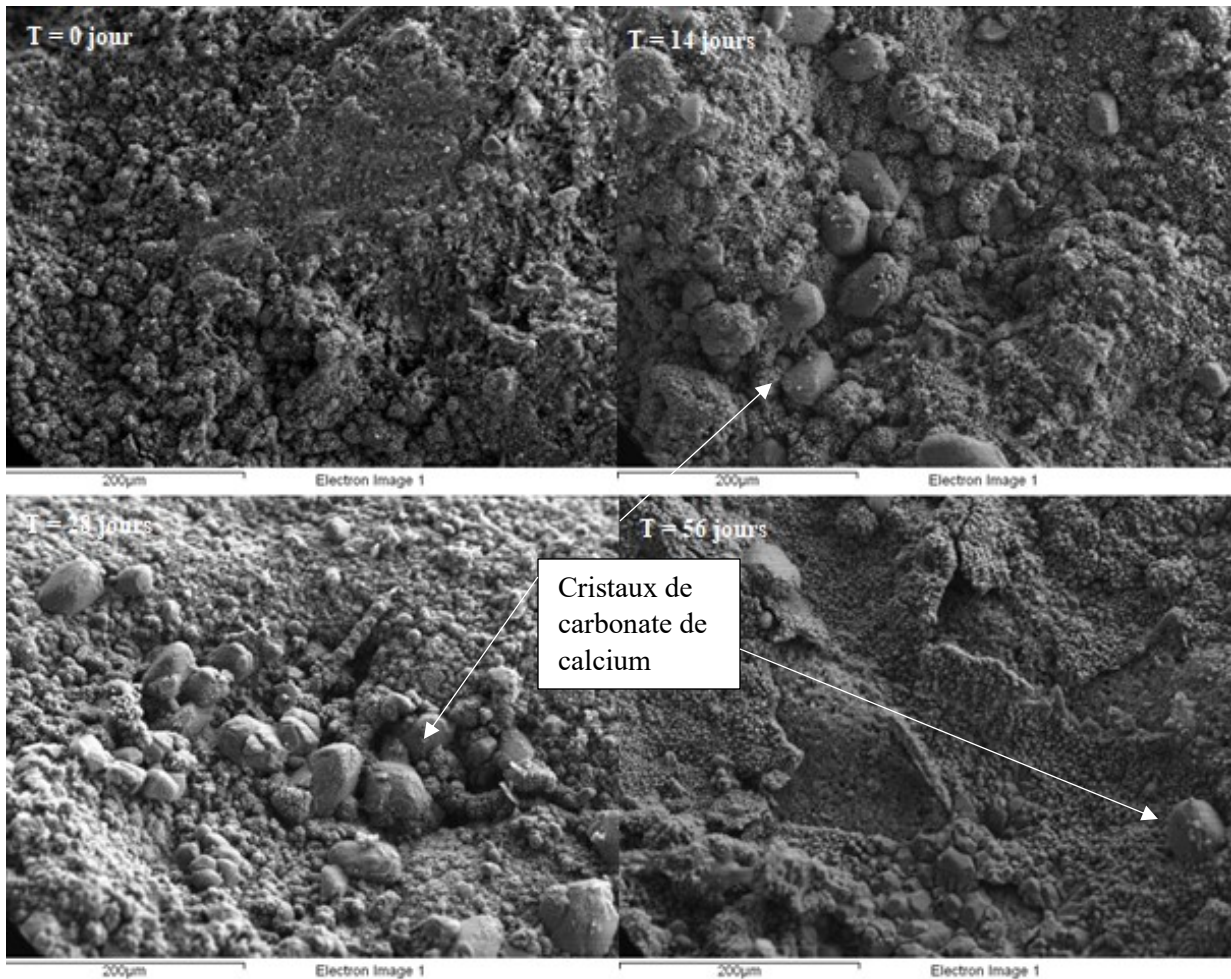


Figure 5.4 – Évolution de la dégradation d'interface de coulis au MEB pour un écoulement neutre

Globalement l'évolution de la dégradation par écoulement neutre analysé au MEB ne montre que peu de changement. Effectivement, visuellement parlant, les surfaces des échantillons qui ont été analysés demeurent constantes pour l'ensemble des essais. Par endroit (T = 28 jours) il est possible d'observer la croissance de cristaux de carbonate de calcium, cependant ce regroupement a été observé sur l'ensemble des phases de dégradation (T=0, T=14, T=28 et T=56). Il n'est donc pas possible d'obtenir des conclusions non spéculatives sur la dégradation par écoulement neutre des interfaces de coulis de ciment.

À l'inverse la dégradation engendrée par un écoulement acide est apparente directement dans la matrice cimentaire. La figure 5.5 montre la dégradation d'interface du coulis de ciment par écoulement acide pour des intervalles de temps allant de 0 à 56 jours.

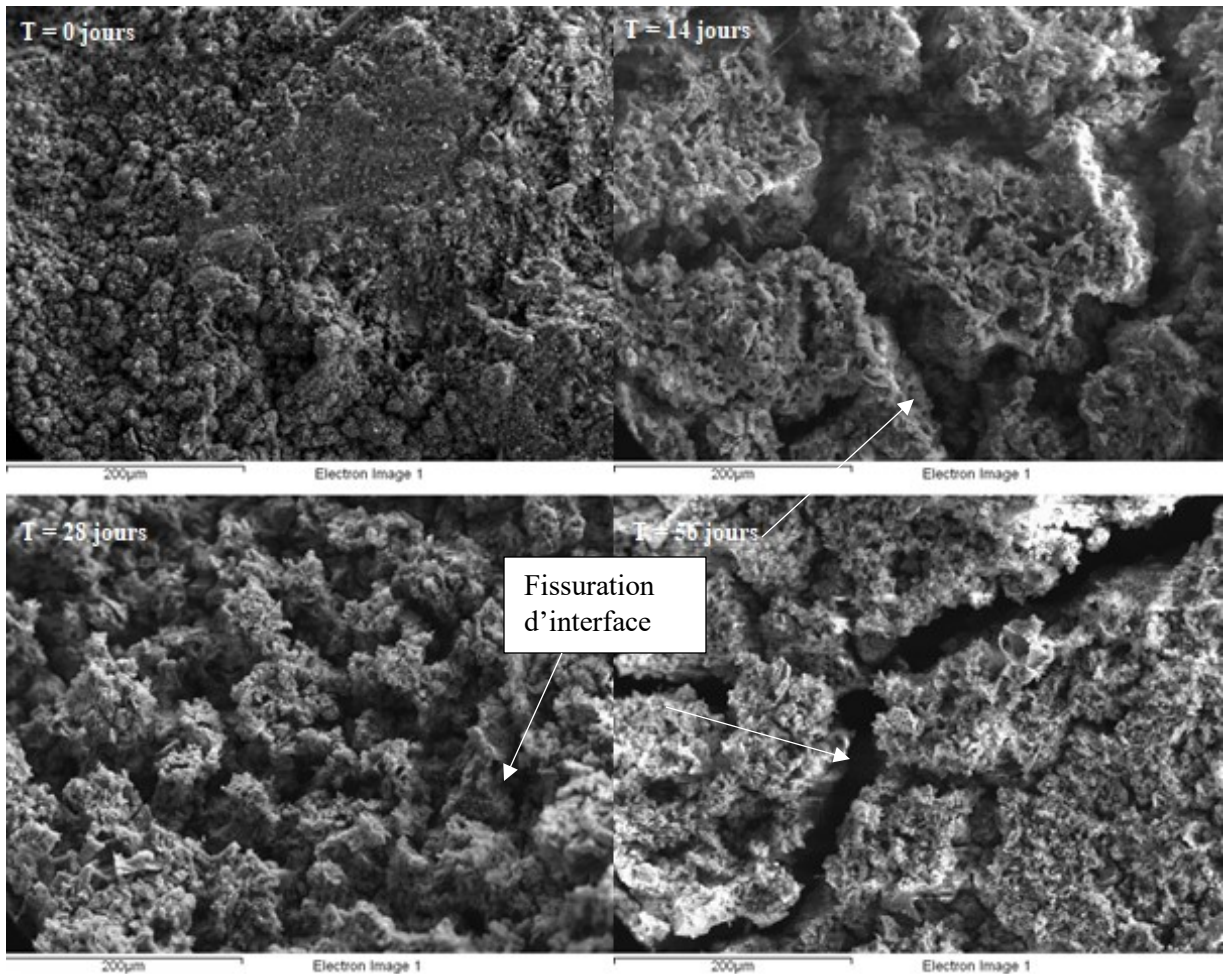


Figure 5.5 – Évolution de la dégradation d’interface de coulis au MEB pour un écoulement acide

L'évolution de la dégradation par écoulement acide montre une destruction de la matrice cimentaire induisant la destruction de la microrugosité d'interface ($T = 14$) et exposant directement la matrice cimentaire à l'écoulement. On assiste initialement à une fissuration d'interface par dissolution. La dégradation acide empêche également la croissance des cristaux observée. Il est possible de voir que la dissolution globale par le flux d'acide demeure pour chaque intervalle de temps. Ce dernier aspect semble causer une augmentation de la porosité de surface contribuant à engendrer des zones de dissolution préférentielles (fissures plus profondes). Cette augmentation n'est toutefois pas bénéfique pour la résistance au cisaillement d'un joint (voir sous-section 5.5 et 5.6). Une forte présence d'aluminium ou de sulfates, souvent associée à de l'ettringite secondaire aurait, par exemple, pu être observée. À noter qu'aucun gonflement d'interface n'a été observé sur les portions d'interface analysées.

5.1.2. La dégradation du mortier – Sika 212

L'évolution de la dégradation des interfaces de mortier est présentée à la figure 5.7. Cette dernière affiche les variations causées par l'écoulement neutre et acide pour deux intervalles, soit 0 et 56 jours.

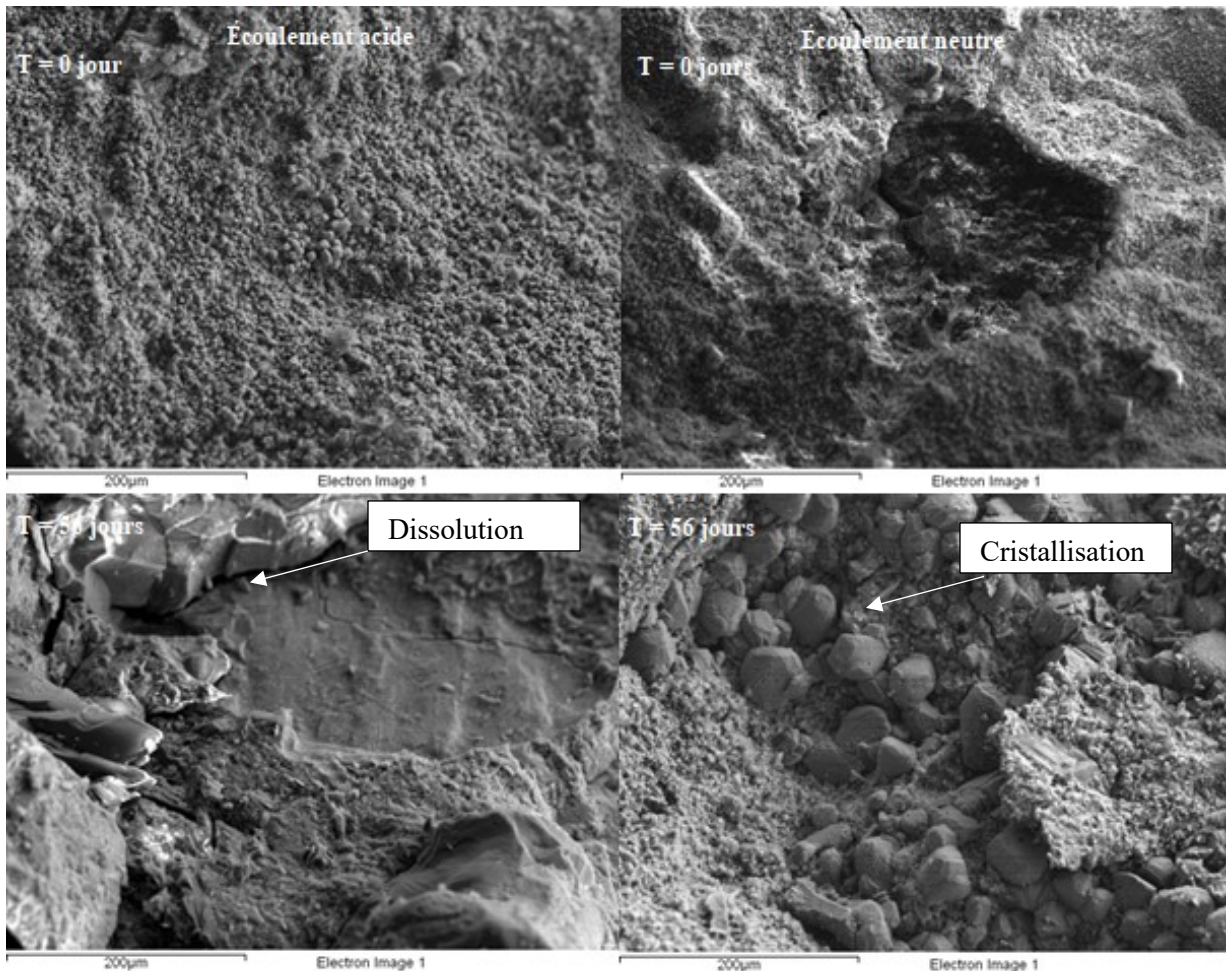


Figure 5.6 – Évolution de la dégradation d'interface de mortier au MEB pour un écoulement neutre et acide

Globalement, la dégradation des interfaces de mortier est similaire à celle observée sur les interfaces de coulis de ciment. Lorsque l'échantillon n'a pas encore été dégradé, il possède une fine couche de carbonate de calcium pour la dégradation neutre qui est complètement dissoute par le flux acide (montage acide). On peut voir sur la partie de droite de la figure 5.6 (montage neutre) qu'une cristallisation des oxydes de calcium a encore une fois eu lieu à l'intérieur des cavités d'interfaces. La partie de gauche de la figure 5.6 (montage acide) montre une dissolution

uniforme de l'interface. Contrairement au coulis de ciment, la porosité d'interface du mortier ne semble pas affectée par la dégradation acide. Cette dernière causerait d'abord une destruction de la couche d'oxyde de calcium pour ensuite dissoudre (lissage d'interface) la matrice cimentaire, exposant ainsi les grains de sable.

À l'instar du coulis de ciment, de l'ettringite a pu être observé sur les interfaces de mortier (Sika 212). La figure 5.7 montre de l'ettringite observée sur un échantillon dégradé à l'acide pendant 56 jours. Cependant, les mêmes cristaux en forme d'aiguille ont été observés sur des interfaces non dégradées ainsi que sur les interfaces dégradées à l'eau. Par conséquent, il est possible d'établir qu'il s'agit d'ettringite primaire et qu'il est normal d'en retrouver dans les cavités telles que celle présentée par la figure 5.7. La présence d'ettringite secondaire aurait pu causer un gonflement du matériau affaiblissant ses propriétés mécaniques.

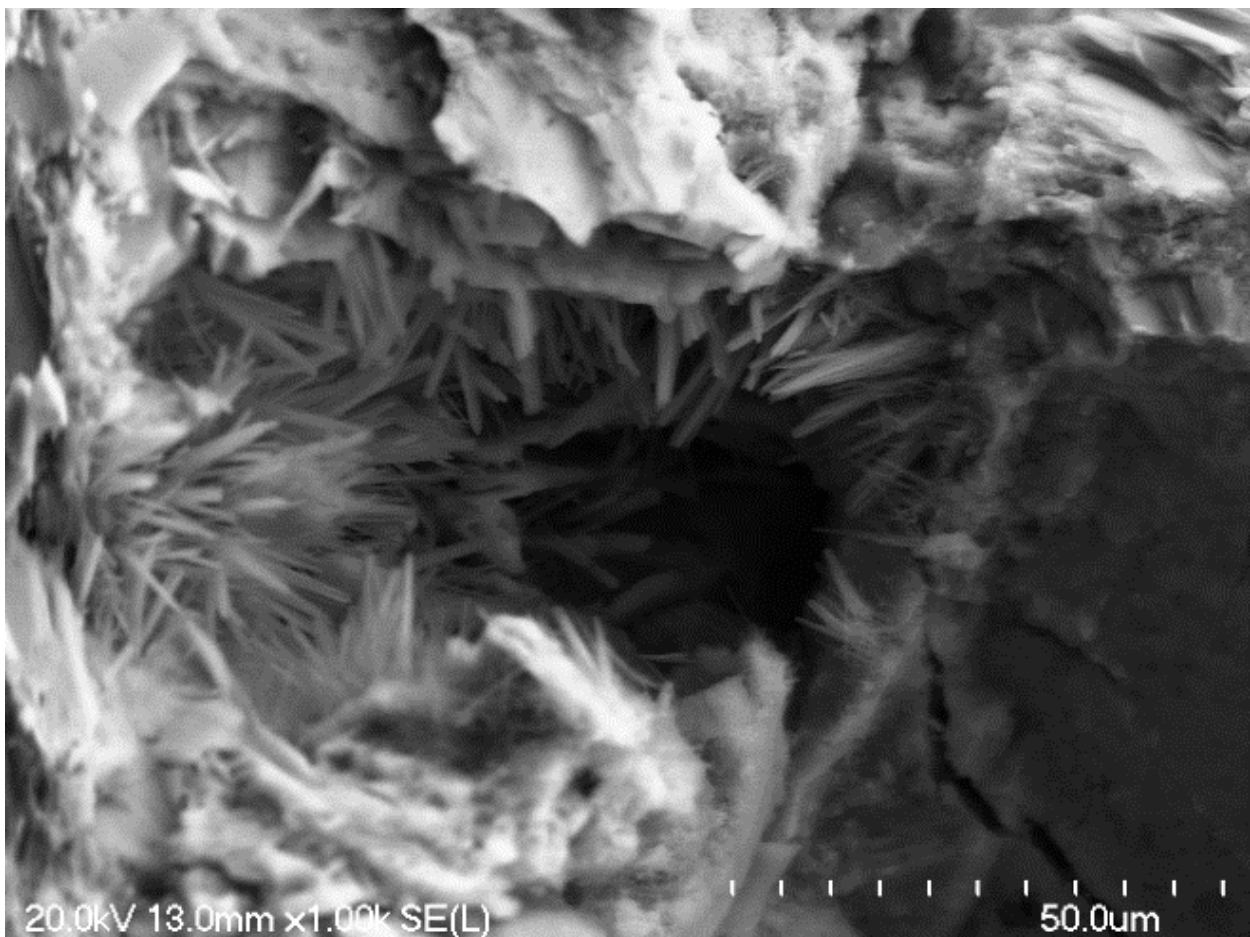


Figure 5.7 – Ettringite primaire observée sur l'interface de mortier cimentaire

5.1.3. La dégradation du roc – granite

L'évolution de la dégradation des interfaces de roc (granite) est présentée à la figure 5.8. Cette dernière illustre les variations causées par l'écoulement neutre et acide pour deux intervalles soit : 0 et 56 jours.

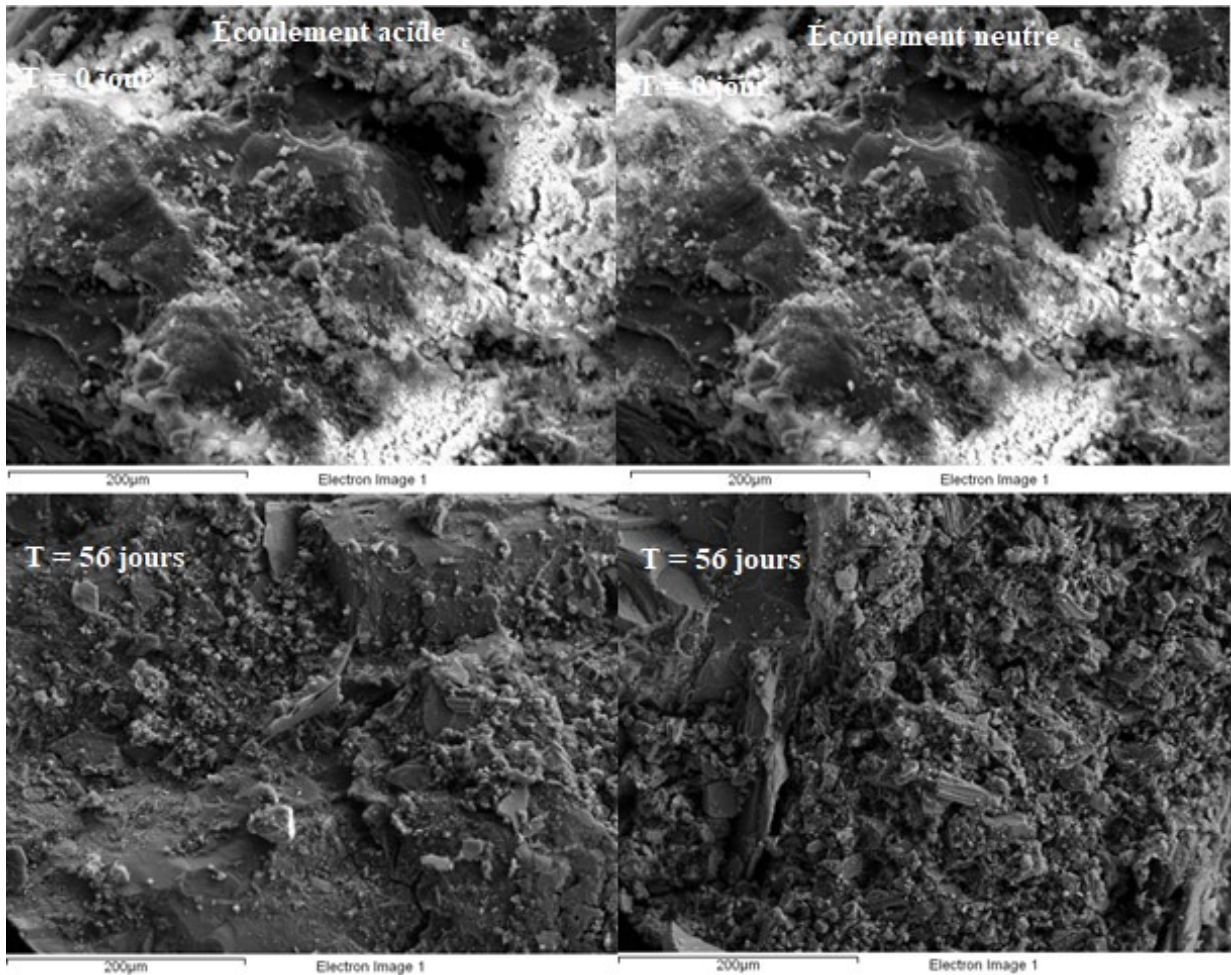


Figure 5.8 – Évolution de la dégradation d'interface de roc au MEB pour un écoulement neutre et acide

La détérioration des interfaces rocheuses ne semble affectée par rapport à celles observées sur les interfaces des matériaux cimentaires. Premièrement, il est possible de constater de gros cristaux de silice sur les échantillons non dégradés. Le quartz et les feldspaths représentent la majorité de la surface exposée sur la figure; cependant des traces de coulis cimentaire et de carbonate de calcium dues à la fabrication des échantillons peuvent être observées. Pour la dégradation à l'écoulement neutre, la surface de roc semble intacte. Bien que le granite soit

sensible aux acides, un écoulement de pH = 5 ne semble pas suffisamment corrosif pour occasionner de la dissolution préférentielle augmentant la porosité globale de l'interface. Pour finir, les interfaces rocheuses ne semblent pas subir de dégradation chimique quelconque.

5.1.4. Conclusion des résultats du MEB

Les résultats présentés dans cette section ont pour objectif de vérifier la présence de dégradations différentes à l'érosion et à la dissolution par écoulement sur les interfaces. En ce sens, aucun signe de dégradations non prévues, tel que l'ettringite secondaire, la carbonatation du béton, etc., n'a pu être identifié. De plus, il a été observé que la dégradation engendrée par l'écoulement acide engendrait une destruction de la microrugosité des surfaces par dissolution de la couche d'oxyde de calcium et de la matrice cimentaire. Aucune conclusion n'a pu être établie par rapport aux résultats des échantillons dégradés. Globalement, le coulis de ciment et le mortier présentaient des dégradations visuellement et chiquement similaires bien que le mortier semblait plus résistant à la dégradation accélérée. Finalement, que ce soit pour le montage en écoulement neutre ou en écoulement acide, les surfaces rocheuses ne semblaient pas ou peu affectées par les flux. Les sous-sections 5.2 et 5.3 font suite à cette investigation.

5.2. Analyse par ICP

Les données issues de ces essais sont présentées aux pages 13 et 14 de l'annexe B. La figure 5.9 expose la concentration en silicium présent dans la solution aqueuse de 0 à 56 jours de dégradation pour la série de dégradation #4.

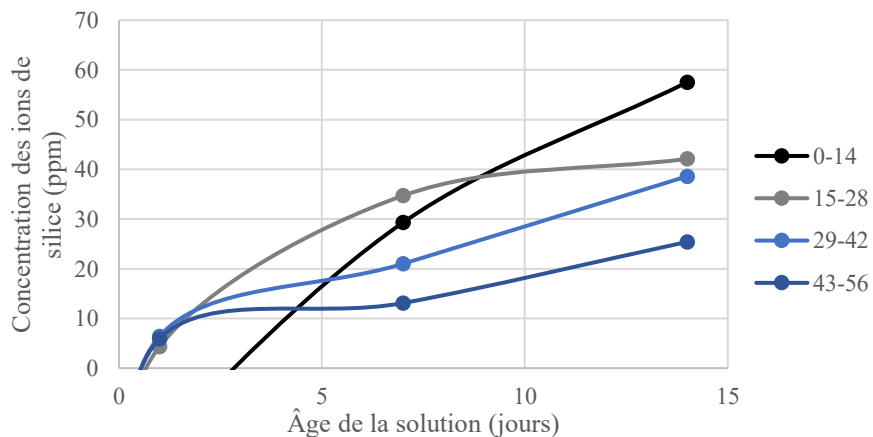


Figure 5.9 - La concentration de silice en ppm dans la solution selon le temps de dégradation

Les données issues des tableaux B13 et B14 peuvent être encadrées par des graphiques telles que la figure 5.9. Cependant pour des soucis d'allègement du document, seule la concentration en silicium est détaillée sous cette forme.

Globalement, on peut voir une hausse constante de la concentration en silicium dans la solution, et ce, pour les quatre périodes. La hausse de la concentration en silicium est synonyme de la dégradation d'interface puisque cet élément fait partie intégrante des mélanges cimentaires tels que le Sika 212 ou le coulis de ciment. De plus, il est intéressant de noter que la dégradation semble moins importante suivant le temps de dégradation. Effectivement, la concentration en silicium dans l'eau, à un âge de solution de 14 jours, diminue avec le temps de dégradation total. En ce qui a trait aux concentrations ioniques des autres éléments analysés, soit le potassium, le calcium, le magnésium, l'aluminium et sodium, elles suivent toutes la même tendance que celle présentée par la figure 5.9.

5.3. Analyse par DRX

La figure 5.10 témoigne des résultats obtenus de la DRX sur le dépôt de surface présent sur les surfaces de coulis ayant été dégradés à l'acide pendant 56 jours. La poudre analysée a été prélevée par un délicat brossage des interfaces.

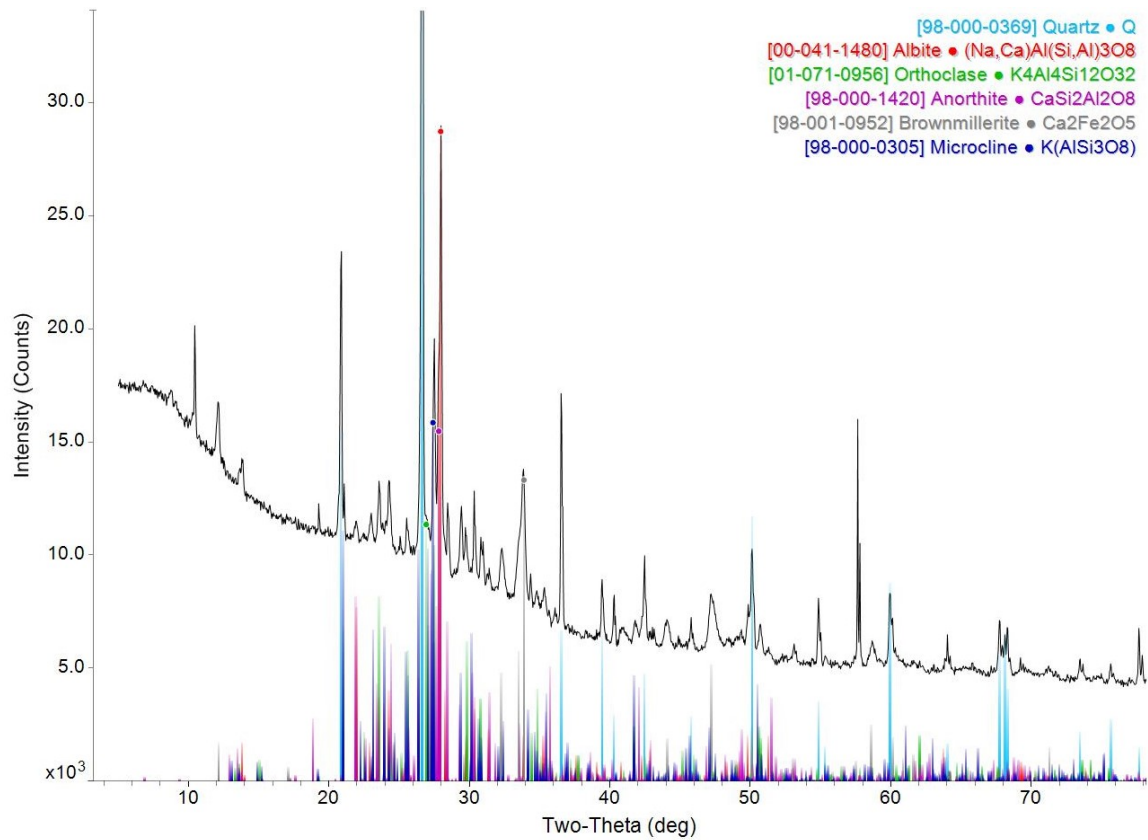


Figure 5.10 – DRX effectuée sur un dépôt de surface d'une éprouvette dégradé à l'acide

Globalement, l'analyse du dépôt de surface obtenu sur les interfaces de type cimentaire suivant la dégradation par la solution acide montre encore une fois une dégradation typique. La DRX expose plutôt des minéraux tels que le quartz, l'albite ainsi que des feldspaths. Par conséquent, la dissolution du calcium présent dans la pâte de ciment a contribué à l'exposition des minéraux qui se sont déposés sur les interfaces dégradées. En somme, les analyses effectuées sur la solution acide et sur les interfaces dégradées par cette solution n'ont pas démontré la présence de type de dégradations supplémentaires à la dissolution et à l'érosion qui, comme supposé initialement, semble gouverner la détérioration d'interface.

5.4. Reproductibilité des éprouvettes

Les résultats présentés dans cette section ont pour objectif de valider le concept final des éprouvettes utilisées dans l'étude tout en vérifiant la constance des données obtenues pour une dégradation par flux acide. Pour ce faire, les variations des résultats de différence de masse (avant et après dégradation), de coefficient de rugosité ainsi que de résistance au cisaillement ont été analysées. Au total, la série de reproductibilité inclut six éprouvettes issues de la même fabrication. : 3 témoins et 3 dégradées à l'acide durant 28 jours.

C'est en effectuant le comparatif des résultats obtenus grâce à ces essais qu'il a été possible de témoigner de la validité des données sortantes d'une seule éprouvette puisqu'un faible écart de valeurs obtenues sur des éprouvettes soumises aux mêmes paramètres de dégradation signifie que la reproductibilité des échantillons est constante. Les conclusions issues de cette section ont ainsi permis de réduire considérablement le nombre d'éprouvettes fabriquées et testées en laboratoire.

5.4.1. Variation de la masse

La variation de la masse constitue la première variable qui a été recueillie lors de la dégradation des trois échantillons de reproductibilité. Cette manipulation consistait à calculer la différence de masse des deux interfaces composant l'éprouvette qui survenait avec la dégradation. Par conséquent, à la fin du processus de fabrication (une fois séchés), les parties supérieures et inférieures des échantillons étaient pesées indépendamment l'une de l'autre. Le processus était répété une semaine après l'étape de dégradation des interfaces. Étant donné que seulement les interfaces étaient dégradées, il est possible de noter la variation de la masse des différents matériaux. Il est important de noter que tous les résultats entourant la variation de la masse des interfaces ont été recueillis et qu'il est possible les retrouver aux pages 6 à 8 de l'annexe B.

La figure 5.11 expose les variations obtenues **pour les interfaces de coulis de ciment** qui ont subi une dégradation acide (pH = 5) durant 28 jours.

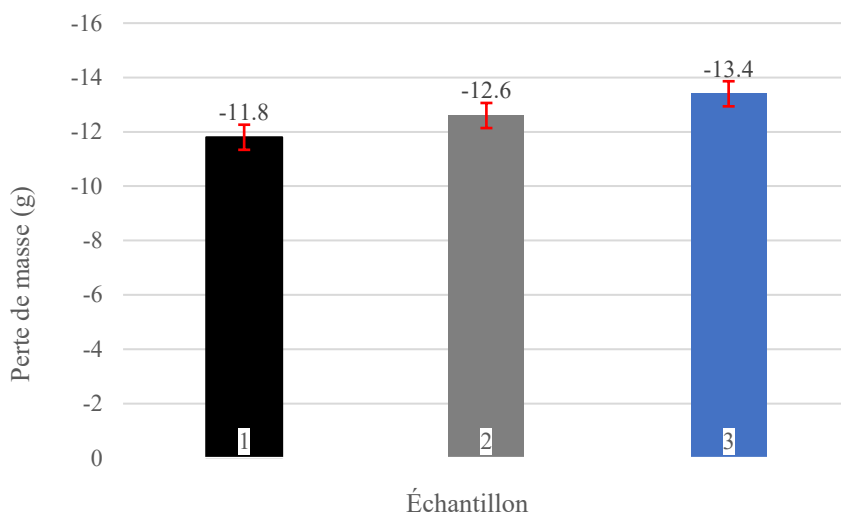


Figure 5.11 – Variation de la masse des surfaces de coulis de ciment pour une dégradation acide de 28 jours

Il est possible de constater que la variation de la masse du coulis de ciment est constante entre les trois échantillons. La figure indique une dégradation moyenne d'environ 12g pour les trois interfaces en présentant un écart-type inférieur à 1 g. Pour ce qui est de la valeur absolue de perte de masse, il est important de considérer que les interfaces ont été finement brossées afin de retirer le dépôt de surface qui aurait pu être à l'origine de la variabilité dans les résultats. La figure 5.12 illustre les variations entre **les surfaces de mortier** par rapport aux résultats de différence de masse.

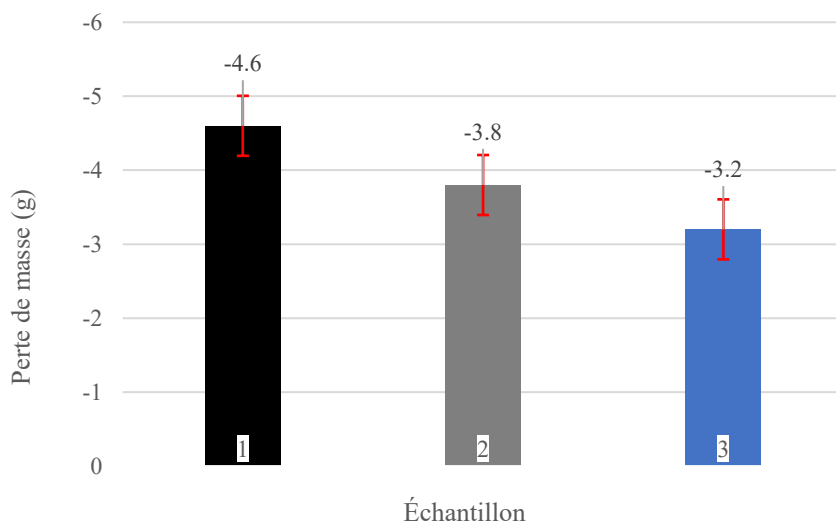


Figure 5.12 – Variation de la masse des surfaces de mortier pour une dégradation acide de 28 jours

Encore une fois, la dégradation entre les surfaces de mortier des éprouvettes est constante. La figure 5.12 affiche une moyenne de perte de masse d'environ 3,8 g pour encore une fois présenter un écart-type inférieur à 1 g. Bien que ces interfaces aient également été finement brossées, le dépôt poussiéreux de surface était inexistant.

De plus, il est possible de remarquer que la dégradation des interfaces de mortier est environ 4 fois inférieure à celle du coulis. Cet aspect concorde avec les analyses effectuées au MEB qui montraient que les interfaces de coulis se dégradait fortement en profondeur comparativement au coulis de ciment. Par conséquent, cette dégradation engendrait un affaiblissement, voire un détachement, des aspérités de surface qui se concluait par la déposition sur l'interface d'une fine couche poussiéreuse.

En somme, il est possible d'affirmer grâce aux résultats de différence de masse mesurée sur les échantillons que la dégradation du coulis de ciment est plus rapide que celle du mortier choisi (Sika 212) pour une dégradation par flux acide. De plus, par rapport aux résultats de différences de masse, les échantillons se dégradent à une vitesse similaire et constante, et ce pour les deux matériaux.

5.4.2. Variation du JRC

La variation de la rugosité constitue la deuxième variable analysée pour témoigner de la variabilité des éprouvettes ayant subi une dégradation par écoulement acide. Une fois les interfaces dégradées, il était possible de comparer les deux numérisations afin d'obtenir une variation constituant l'évolution de la rugosité selon le temps de dégradation. Toutes les surfaces présentées dans cette étude (sous-section 5.5) ont été numérisées deux fois afin d'obtenir plusieurs résultats concernant l'évolution de la rugosité.

La figure 5.11 expose la variation de la rugosité pour trois interfaces de coulis cimentaire ayant été soumis à un flux acide durant 28 jours.

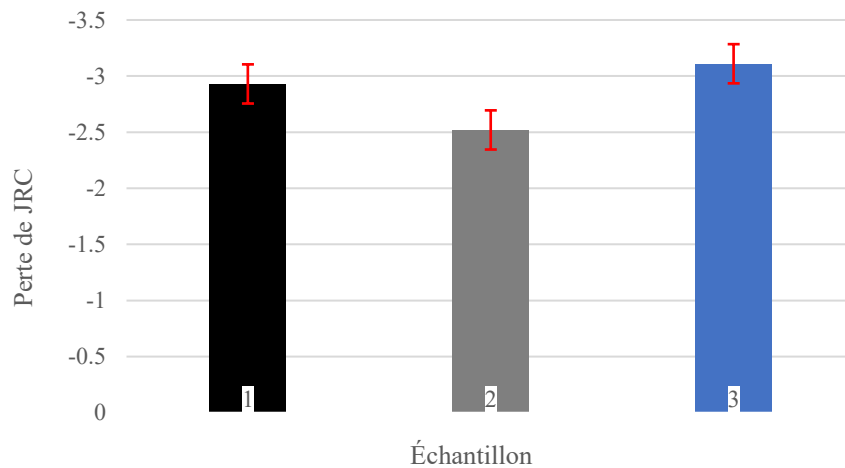


Figure 5.13 – Variation des coefficients de rugosité (JRC) de coulis (dégradation de 28 jours)

Initialement, ces trois interfaces faisaient partie du même sous-groupe de rugosité présentant un JRC variant de 13,0 à 14,5. Il est possible de constater qu'une perte de rugosité similaire a eu lieu par dissolution acide pour les trois interfaces de coulis de ciment. Effectivement, une perte moyenne de 2,8 points de JRC peut être observée, dévoilant un écart-type de 0,2. Par conséquent, les interfaces de coulis de ciment, qui ont été brossés finement afin de dévoiler leur rugosité sans déposition, affichent une perte de rugosité effective variant de 2,5 à 3,0 points de JRC. Étant donné que la rugosité évolue de façon constante à travers la dégradation acide des trois échantillons, la reproductibilité des surfaces de coulis de ciment des éprouvettes se confirme. En ce qui a trait à l'évolution de la rugosité des interfaces de mortier, on peut voir qu'elle est moins élevée pour les trois échantillons (figure 5.14).

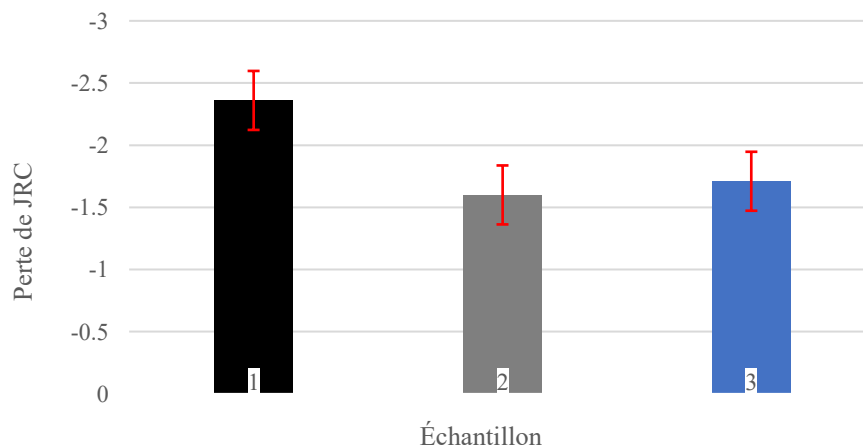


Figure 5.14 – Variation des coefficients de rugosité (JRC) mortier (dégradation de 28 jours)

La diminution du JRC varie entre 1.6 et 2.4 pour une formée une moyenne négative d'environ 2 points du coefficient de rugosité et un écart-type de 0.4. Par conséquent, la rugosité de surface du mortier aurait été moins affectée par la dégradation acide que celle du coulis, ce qui est représentatif des propriétés mécaniques des matériaux. Encore une fois, bien que les interfaces de mortier aient été brossées, la rugosité apparente avant brossage était représentative des résultats finalement affichés. Étant donné que la dégradation d'interface était fortement superficielle, contrairement à celle du coulis de ciment qui a causé une augmentation de la porosité, il n'y a pas réellement eu de dépôt retiré lors du brossage.

En somme, il est possible d'appuyer l'affirmation initiale grâce aux résultats de variation des coefficients de rugosité effectués sur les échantillons, qui signifiait que : «la dégradation du coulis de ciment est plus rapide que celle du mortier choisi (Sika 212) pour une dégradation par flux acide ». De plus, par rapport à ces mêmes résultats, les échantillons se dégradent à une vitesse affichant une constance, et ce pour les deux matériaux.

5.4.3. Résistance au cisaillement

L'essai de cisaillement direct constitue le troisième et dernier essai réalisé sur les échantillons de la série de reproductibilité. Il nous permet d'obtenir différents résultats entourant la performance mécanique des aspérités composant les interfaces intactes et des surfaces dégradées. Ces résultats sont la dilatance du joint de l'éprouvette ainsi que la résistance au cisaillement qui peut être également exposée sous forme d'enveloppe de rupture (Mohr-Coulomb). Il est important de noter que les résultats issus du cisaillement d'un échantillon témoin ont également été insérés dans les figures présentées dans cette sous-section. Par ailleurs, la majeure partie des résultats de cisaillement sont exposés à la sous-section 5.6 et 5.7.

La figure 5.15 expose les résultats de résistances au cisaillement où la contrainte normale était de 100 kPa.

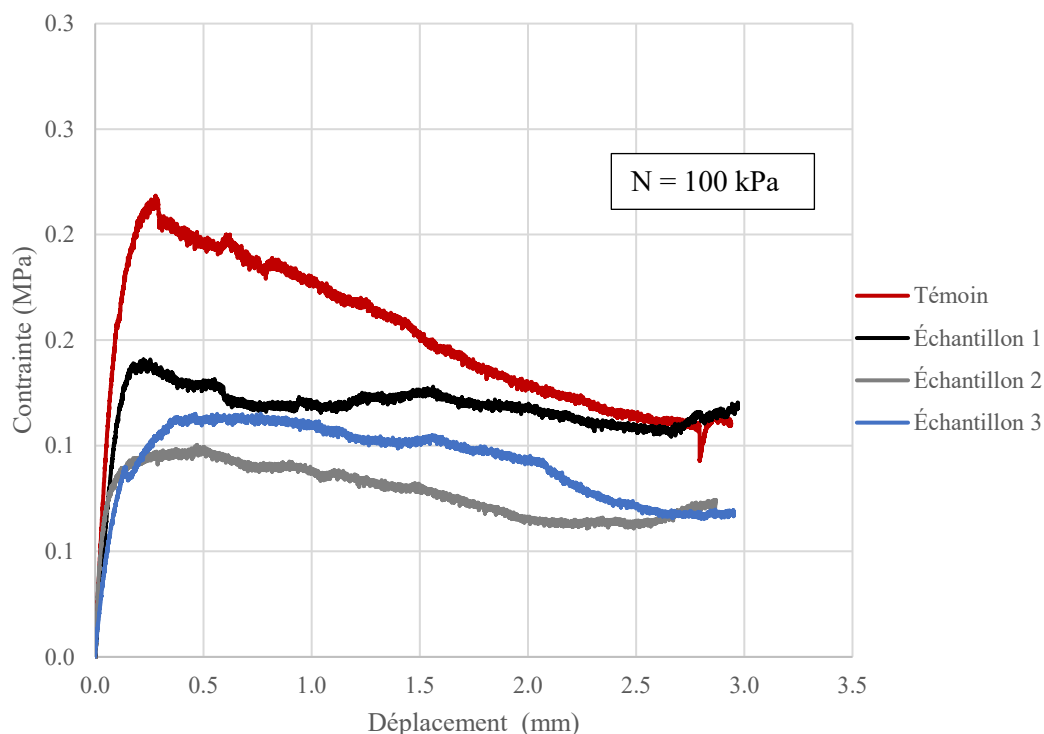


Figure 5.15 – Résistance au cisaillement des éprouvettes ayant été dégradées en solution acide durant 28 jours

Premièrement, il est possible de constater que les baisses de résistances suivant les résistances maximales (au pic) des échantillons dégradés sont quasi inexistantes, la figure affiche plutôt l'atteinte de plateaux correspondant à la résistance résiduelle au cisaillement des éprouvettes. Lorsqu'on compare les résultats issus des trois échantillons, on peut y remarquer une certaine constance dans les valeurs obtenues qui varient d'environ 50 kPa. On remarque notamment que les tendances globales des essais affichent un plateau résiduel plutôt qu'une résistance au pic pour ces trois échantillons. Deuxièmement, la comparaison entre le témoin et les joints dégradés montre un comportement inverse. Effectivement, au-delà des valeurs de résistance au cisaillement qui sont généralement plus élevées pour l'éprouvette qui n'a pas subi de dégradation acide, le comportement du joint en cisaillement n'est pas identique aux éprouvettes dégradées. On retrouve une résistance maximale suivie d'une décroissance, signe d'endommagement des aspérités. Finalement, un plateau est atteint pour un déplacement de 2,5 mm qui est légèrement supérieur aux joints dégradés.

La figure 5.16 expose les résultats de dilatance qui ont été enregistrés lors des essais de cisaillement direct où la contrainte normale était de 100 kPa. Les résultats montrent que la dilatance des joints adopte un comportement similaire tout au long de l'essai de cisaillement, et ce même pour l'échantillon non dégradé.

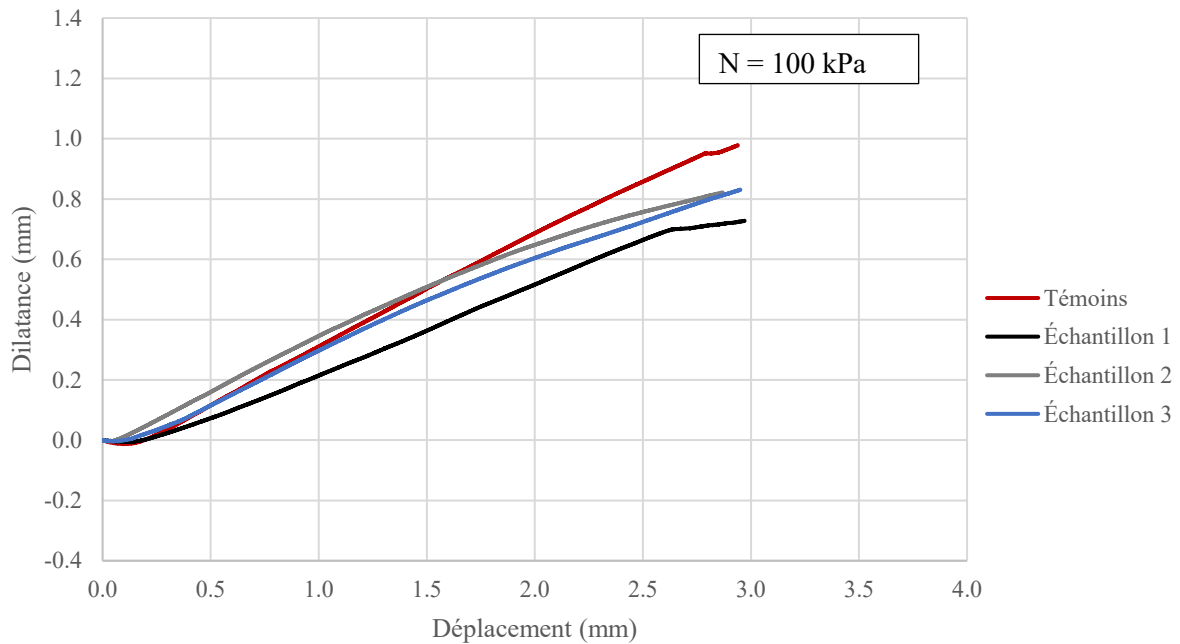


Figure 5.16 – Résultats de la dilatance des éprouvettes ayant été dégradées en solution acide durant 28 jours

En effet, il est possible de voir une tendance globale dans la dilatance causée par les aspérités d'interfaces. Cependant, la dilatance du témoin est en moyenne plus élevée que celles des éprouvettes détériorées à l'acide. Par conséquent, les aspérités composant la rugosité d'interface se détériorent de façon similaire les unes par rapport aux autres. Les valeurs résiduelles issues des essais de cisaillement ont également permis de produire les enveloppes de rupture des échantillons dégradés.

La figure 5.17 affiche des régressions linéaires pouvant constituer des enveloppes de ruptures selon le critère de Mohr-Coulomb.

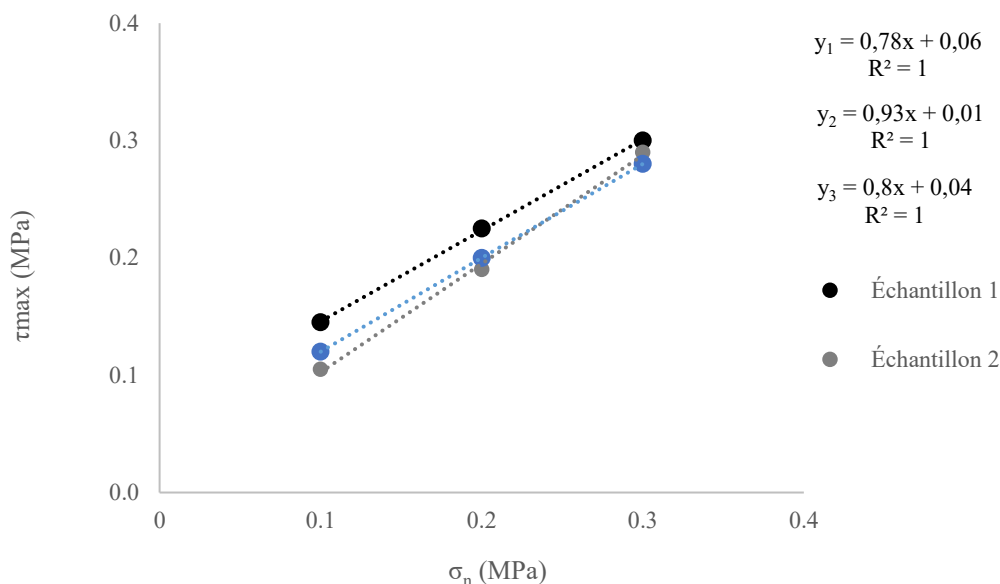


Figure 5.17 – Enveloppes de rupture des résistances résiduelles (éprouvettes de reproductibilité)

Encore une fois, les résultats obtenus sur les trois échantillons sont similaires. Premièrement, les tendances des droites, signifiant l'angle de frottement des joints, montrent qu'ils sont quasiment identiques pour les échantillons dégradés. La cohésion apparente des joints, l'ordonnée à l'origine des droites, varie de 60 à 100 kPa pour les trois éprouvettes. De plus, l'affichage des R^2 sur la figure permet d'affirmer une forte linéarité dans les résultats de cisaillement issus des trois contraintes normales de 100, 200 et 300 kPa.

5.4.4. Conclusions préliminaires des résultats

Il est possible de conclure que la majorité des résultats obtenus pour les trois éprouvettes de mortier-coulis, ayant été soumis à une dégradation par flux acide, convergent vers des valeurs similaires. Que ce soit, la différence de masse pour chaque interface, l'évolution de la rugosité des joints, ou encore pour les résultats issus des essais de cisaillement direct, les valeurs obtenues demeurent à l'intérieure d'un faible intervalle en plus de présenter des tendances similaires. C'est donc basé sur l'analyse des résultats obtenus dans la série 1, que cette étude a pu poursuivre avec la dégradation des séries 2, 3, 4 et 5 (voir figure 4.1).

5.5. Rugosité d'interface

Cette sous-section présente les résultats en lien avec l'évolution de la rugosité d'interface pour les quatre séries de dégradation soit : mortier-coulis neutre et acide, roc-coulis neutre et acide. Cette partie de l'étude se divise en trois parties pour inclure les trois matériaux étudiés, en mettant l'accent sur le coulis de ciment, qui demeure le matériau lié à la question de recherche de l'étude.

Les prochaines divisions incluent premièrement une présentation des JRC initiaux, c'est-à-dire la rugosité des échantillons tels que fabriqués. Cette partie a pour objectif de faire ressortir des rugosités moyennes en lien avec les différentes séries d'éprouvettes. Par la suite, l'évolution de la dégradation d'interface selon les flux neutre et acide est exposée. Finalement, une brève comparaison entre une interface non brossée et deux interfaces brossées soumises aux mêmes temps de dégradation est présentée. Il est important de noter que cette section inclue la totalité des résultats issus des numérisations par profilomètre laser.

5.5.1. Les interfaces de coulis de ciment

Le tableau 5.1 de la page suivante expose les rugosités d'interfaces de coulis de ciment telles avant la dégradation par écoulement pour toutes les séries. Il est par la suite, possible de produire un coefficient de rugosité moyen. Les différentes séries de construction d'éprouvettes représentent :

- 1 : Échantillon mortier-coulis dégradé à l'acide (reproductibilité);
- 2 : Échantillon mortier-coulis dégradé à l'acide;
- 3 : Échantillon mortier-coulis dégradé à l'eau;
- 4 : Échantillon roc-coulis dégradé à l'acide;
- 5 : Échantillon mortier-coulis dégradé à l'acide.

Tableau 5.1 – Coefficients de rugosité initiaux pour les surfaces de coulis

Série :	1	2	3	4	5
JRC	14,7	12,9	13,5	12,5	13,0
	13,0	12,8	13,3	12,1	13,2
	13,4	12,0	13,5	14,4	15,2
	-	12,5	13,3	12,4	11,9
	-	12,6	13,5	15,7	14,7
	-	12,3	13,4	15,7	12,7
JRC Moy.	13,7	12,5	13,4	13,8	13,4

Dans un premier temps, lorsqu'on compare les JRC moyens pour les différentes séries d'échantillons, on peut voir que la rugosité des interfaces fabriquées ne varie que faiblement. Effectivement, les valeurs moyennes obtenues s'insèrent à l'intérieur d'un domaine d'intervalle faible [12,5-13,8] démontrant que les interfaces font partie d'un même groupe de JRC. Les séries de dégradation 1, 2 et 3, constituant les éprouvettes de mortier-coulis, montrent également cette constance dans la fabrication des échantillons. Étant donné que les interfaces de coulis étaient fabriquées à l'aide d'empreintes de silicone identiques, il a été possible de reproduire une rugosité quasi similaire.

Les séries 2 et 3 affichent des variabilités de JRC initiale respectives de 0,9 et 0,2. Cependant, les écarts sont plus importants pour les séries d'éprouvettes roc-coulis. Étant donné qu'il était impossible de produire 12 joints rocheux identiques, il a fallu façonner et sélectionner un groupe d'interfaces de rugosité similaire. C'est pourquoi les rugosités pour les séries 4 et 5 (tableau 5.1) varient de 11,9 à 15,7.

La dégradation d'interface illustrée à la figure 5.18 de la page suivante expose la variation de rugosité selon un temps de dégradation situé entre 0 et 56 jours. La figure témoigne d'une dégradation par écoulement neutre effectuée sur les surfaces de coulis de ciment. Il est important de considérer que les interfaces de coulis des éprouvettes mortier-coulis et des éprouvettes roc-coulis sont présentées dans ce graphique. De plus, aucune interface présentée dans les figures de la sous-section 5.5.1 n'a été brossée.

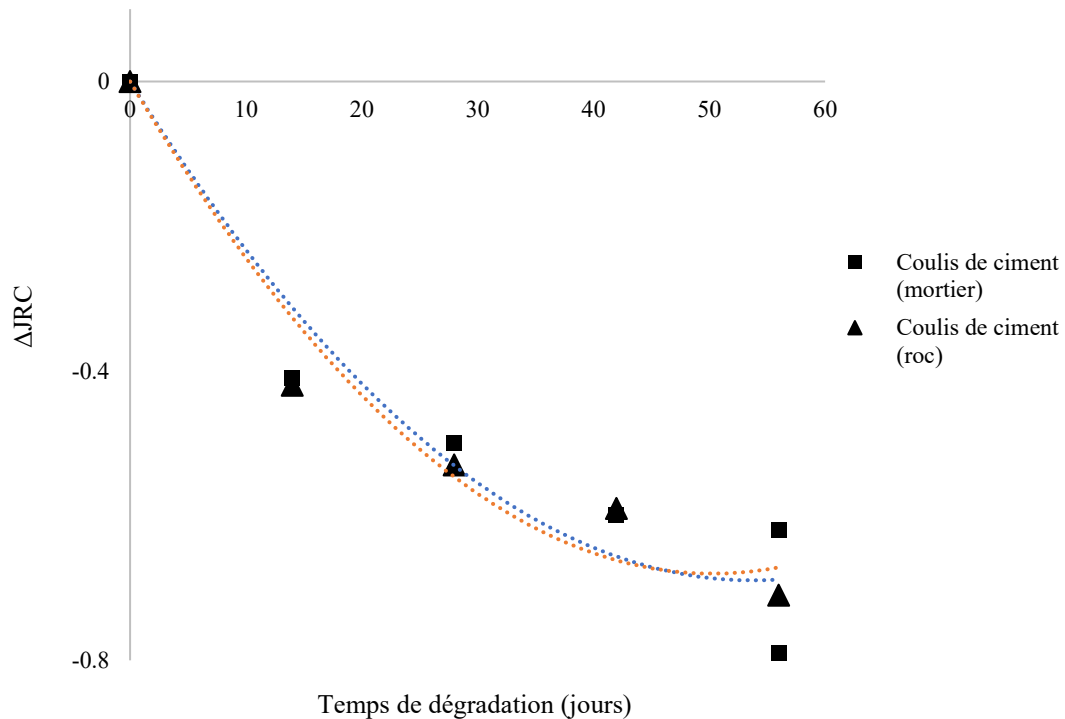


Figure 5.18 – Évolution des coefficients de rugosité des interfaces de coulis pour une dégradation neutre

La figure 5.18 montre que la dégradation par écoulement neutre occasionne une perte de rugosité d'interface. Cette diminution peut principalement se traduire par l'érosion des aspérités menant au lissage du joint. Tout au long de l'essai, on assiste à une diminution du taux de dégradation d'interface, et ce pour les deux séries de dégradation. Par la suite, les surfaces de coulis de ciment adoptent des tendances de dégradation similaires pour ce fluide. Comme montré par les deux courbes de tendances, qui sont presque confondues, les résultats convergent vers des valeurs très rapprochées pour chaque intervalle de dégradation (14, 28, 42 et 56 jours).

La dégradation par flux acide ne semble toutefois pas adopter les tendances affichées par le montage d'écoulement neutre. La figure 5.19 expose ces différences.

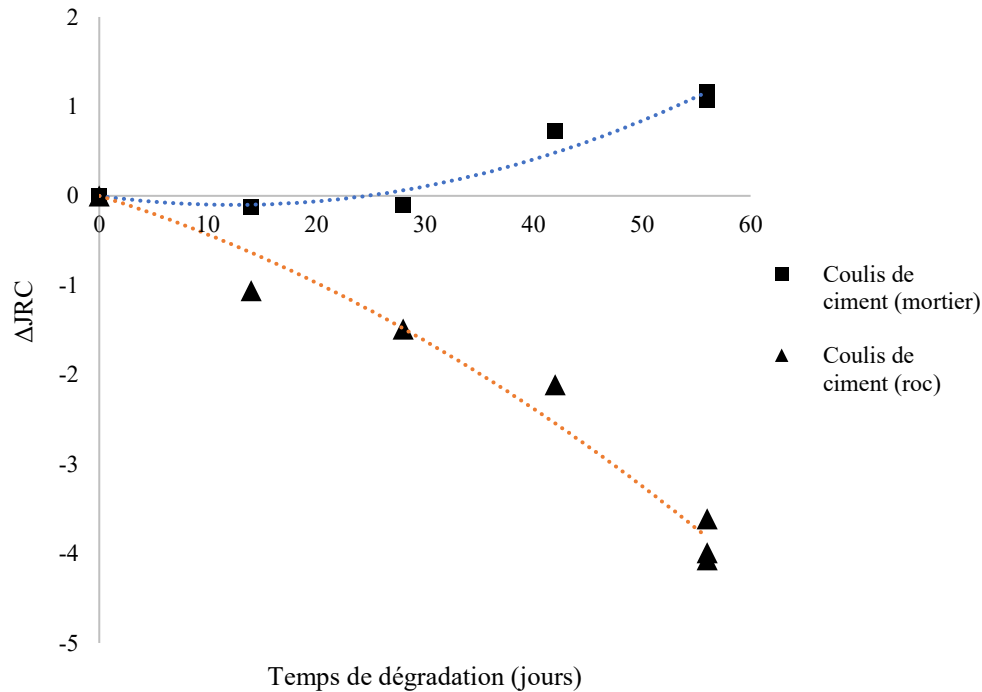


Figure 5.19 – Évolution des coefficients de rugosité des interfaces de coulis pour une dégradation acide

Premièrement, l'évolution des JRC observés est beaucoup plus importante pour la dégradation acide. Effectivement, pour les interfaces de coulis couplées au roc, on assiste à une diminution de 4 points de rugosité sur l'échelle du JRC. La tendance adoptée par la dégradation semble linéaire où aucune stabilisation n'a été atteinte durant les 2 mois de dégradation. Les interfaces de coulis de ciment des éprouvettes mortier-roc montrent une augmentation de 2 points de la rugosité du joint qui ne tend pas vers la stabilisation de la dégradation. Cette augmentation est en opposition avec la tendance affichée par la dégradation des interfaces de coulis des éprouvettes roc-coulis. Cette variation positive peut s'expliquer par certains aspects distincts : les matériaux composants le joint ainsi que le brossage d'interface.

Les matériaux composant le couple d'interfaces semblent jouer un rôle par rapport à la vitesse de dégradation des interfaces de coulis de ciment. Par exemple, sur les éprouvettes de roc-coulis, le joint soumis à un flux acide affecte la cinétique de dégradation en augmentant le potentiel de dissolution des interfaces. Cependant, les interfaces de roc ne semblent pas, ou très peu,

affectées par le fluide acide contrairement à l'interface de coulis de ciment qui subit cette dégradation accélérée (voir sous-section 5.5.3). Par conséquent, l'interface rocheuse demeure intacte et l'interface cimentaire se détériore (tends vers un lissage d'interface) ce qui contribue à diriger le fluide à travers l'éprouvette selon un chemin préférentiel. Cet aspect contribuerait à l'augmentation de la vitesse et la pression sur la surface du coulis, aidant à éroder les aspérités créées par la dissolution acide. Autrement dit, l'érosion préférentielle occasionnée sur les interfaces de coulis aurait un effet de « lissage » d'interface en éliminant le dépôt de surface créée par la dissolution acide (voir sous-section 4.4.7)

Le brossage d'interface a initialement été effectué sur les échantillons de reproductibilité (série 1) afin d'enlever le dépôt de surface et comparer les « vraies » rugosités des joints. Cependant, il semble que processus eut été nécessaire pour l'ensemble des séries par dégradation acide afin d'afficher les tendances réelles de la dégradation d'interface. Le tableau 5.2 expose la variation sur le coefficient de rugosité que peut avoir le brossage d'interface.

Tableau 5.2 – Exposition de la variation du JRC dégradé pour des interfaces brossées ou non

T. dégradation (jours)	Brossée	JRC initial	JRC final	Δ JRC
56	Non	12,5	13,7	1,2
56	Non	12,6	13,7	1,1
56	Oui	12,3	11,4	-0,9

Au cours de la période expérimentale, une des trois interfaces dégradées par flux acide durant 56 jours a été finement brossée afin de recueillir un dépôt et de l'analyser par DRX. Cette manœuvre permet également de confirmer l'effet que peut avoir la dégradation acide sur l'évolution de la rugosité des interfaces de coulis. Globalement, on peut voir le dépôt d'interface contribue à augmenter la rugosité plutôt qu'à la diminuer, comme peut le voir avec les interfaces de coulis des échantillons roc-coulis. Une différence de 2 points de JRC a été mesurée entre les interfaces non brossées et brossées, ce qui change la tendance affichée par la figure 5.19. La dissolution acide qui initialement détruit la microrugosité (baisse de JRC) et par la suite engendre de la dissolution préférentielle (hausse de JRC) créant de faibles aspérités, ou dépôt de surface, semble au final affaiblir l'interface menant à une perte de rugosité (observée après brossage).

5.5.2. Les interfaces du mortier – Sika 212

Bien que le coulis de ciment constitue le matériau principal de l'étude, il est important d'analyser les résultats concernant le matériau dans lequel ce dernier a été injecté. Pour ce faire, le tableau 5.3 expose les rugosités initiales que des interfaces de mortier.

Tableau 5.3 – Coefficients de rugosité initiaux pour les surfaces de mortier

Série :	1	2	3
JRC	14,5	13,4	14,5
	13,3	13,3	14,0
	13,5	13,6	14,3
	-	13,4	13,5
	-	13,1	13,7
	-	12,7	13,9
JRC Moy.	13,7	13,2	14,0

On remarque encore une fois une certaine constance dans les JRC moyens des différentes séries qui affichent un JRC variant de 13,2 à 14,0. Cette constance est également présente à l'intérieur des séries qui présentent de faibles variations de rugosité entre les interfaces (1 au maximum). Il est également possible de comparer les valeurs moyennes exposées dans ce tableau avec les moyennes des séries 1, 2 et 3 du tableau 5.1 puisqu'elles forment un couple d'interfaces. Ces valeurs, qui sont respectivement de 13,7, 12,5 et de 13,4 concordent très bien avec celles du tableau 5.3, montrant une rigueur dans la fabrication des échantillons. On y trouve un écart maximal de 0,7 point JRC qui peut s'expliquer avec le contact partiel, par endroit, des deux matériaux lors de l'injection du coulis cimentaire à travers les deux faces de mortier.

La dégradation d'interface apportée par la figure 5.20 de la page suivante, expose la variation de rugosité selon un temps de dégradation situé entre 0 et 56 jours. La figure témoigne d'une dégradation par écoulement neutre effectuée sur les surfaces de mortier normalisé, le Sika 212. Il est important de considérer qu'aucune interface de mortier n'a été brossée dans cette partie.

La figure 5.20 dévoile que l'évolution de la rugosité des interfaces de mortier ne semble pas constante à travers le temps. Effectivement, la dégradation par écoulement neutre semble diriger les interfaces vers deux tendances distinctes où le changement de direction apparaît à 14 jours sur la figure. Il y a d'abord une diminution de la rugosité globale suivie d'une augmentation qui, après 56 jours, correspond quasiment à la rugosité initiale.

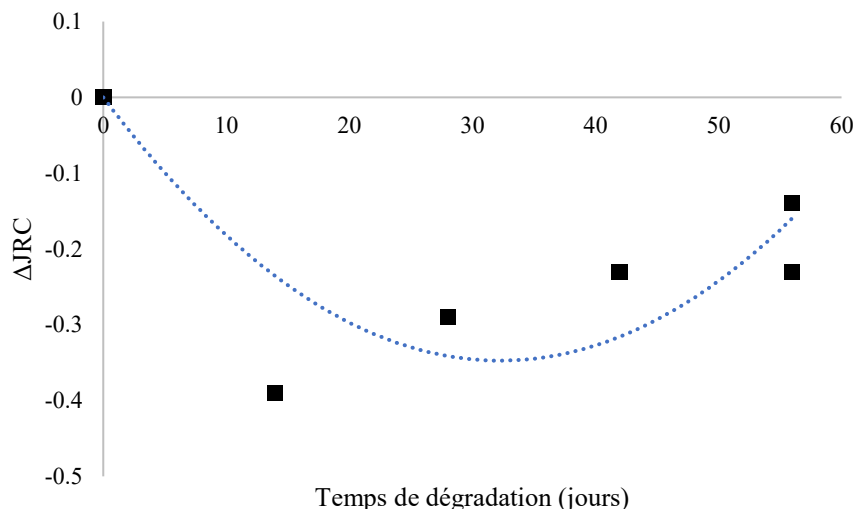


Figure 5.20 – Évolution des coefficients de rugosité des interfaces de mortier pour une dégradation neutre

On parle premièrement d'une destruction partielle de la microrugosité par l'écoulement (dissolution et érosion). La suite des événements peut s'expliquer par l'érosion préférentielle causant l'amplification de certaines cavités ainsi que par la cristallisation des oxydes de calcium. Pour les interfaces de mortier, on ne retrouve que de faibles variations (-0,3 JRC) du coefficient de rugosité. Par conséquent, l'écoulement de l'eau ne semble pas affecter les interfaces sur une période de deux mois.

La figure 5.21 expose la tendance de la dégradation des interfaces de mortier par flux acide. Cette fois-ci, la tendance de détérioration semble identique à celle montrée par la dégradation neutre. Il est également possible d'observer une amplification de cette tendance, c'est-à-dire une diminution de la rugosité jusqu'à 14 jours, suivie d'une augmentation jusqu'à la fin du processus. Cependant, on y observe une augmentation de la rugosité d'interface d'environ 2,5 points sur l'échelle du JRC.

Globalement, on retrouve les mêmes facteurs relatifs à cette tendance de dégradation, c'est-à-dire une détérioration de la matrice cimentaire exposant les grains de sable (silice).

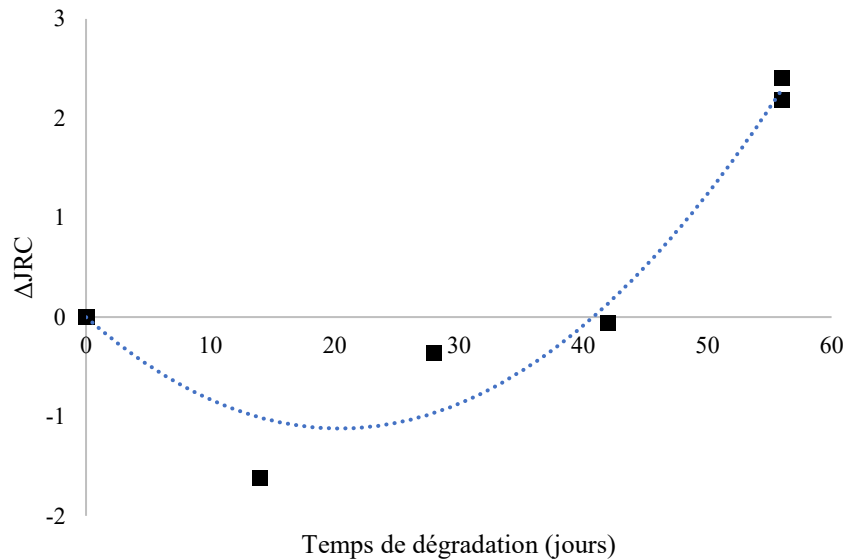


Figure 5.21 – Évolution des coefficients de rugosité des interfaces de mortier pour une dégradation acide

5.5.3. Les interfaces du roc – Granite

Les interfaces de roc ont également été numérisées. Ces dernières sont présentées, telles que fabriquées, par le tableau 5.4.

Tableau 5.4 – Coefficients de rugosité initiaux pour les surfaces de roc

Série :	1	2
JRC	13,8	14,1
	13,7	13,5
	16,7	15,1
	13,6	13,2
	17,3	15,9
	16,5	14,1
JRC Moy.	15,3	14,3

On remarque encore une fois une constance dans les JRC moyens des différentes séries qui affichent un JRC variant de 15,3 à 14,3. Cette constante ne semble toutefois pas être présente à l'intérieur des séries qui affichent une plus grande variabilité (jusqu'à 3 points de JRC) en raison

de la méthode de fabrication des surfaces. Il est également possible de comparer les valeurs moyennes exposées dans ce tableau avec les moyennes des séries 4 et 5 du tableau 5.1. Ces valeurs de 13,8 et de 13,4 de 13,7 sont plutôt éloignées puisque le contact des deux matériaux lors de l'injection du coulis cimentaire se faisait moins bien que sur les interfaces de mortier.

La dégradation d'interface apportée par la figure 5.22, expose la variation de rugosité selon un temps de dégradation situé entre 0 et 56 jours. La figure témoigne d'une dégradation par écoulement neutre effectuée sur les surfaces de granite. Il est important de considérer qu'aucune interface de mortier n'a été brossée dans cette partie.

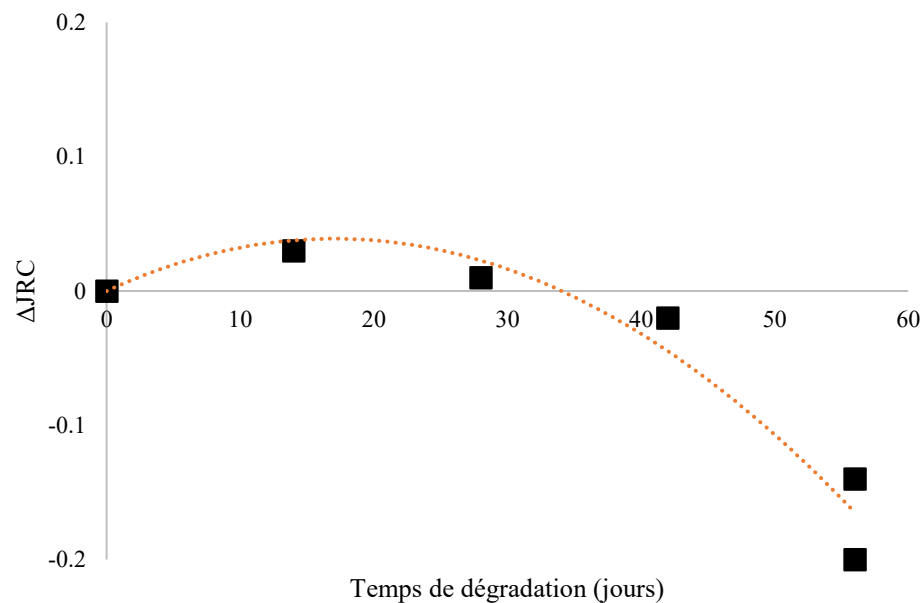


Figure 5.22 – Évolution des coefficients de rugosité des interfaces de roc pour une dégradation neutre

La figure 5.22 expose que l'évolution de la rugosité des interfaces de roc ne semble pas affectée par l'écoulement neutre à travers le temps. Effectivement, bien qu'on puisse noter une légère augmentation du JRC dans les premiers jours de l'expérience qui est suivie par une faible baisse de rugosité jusqu'à 56 jours, ces changements ne sont pas assez élevés pour être attribués à une tendance de détérioration d'interface ($\pm 0,1$ JRC). De plus, le granite est reconnu pour être mécaniquement résistant à l'érosion en plus de présenter une sensibilité face aux acides (pH = 2-3). Cependant, le fluide neutre n'est dommageable pour les interfaces de roc sur cette période.

La figure 5.23 expose une tendance de détérioration semblable à celle montrée par la dégradation neutre, c'est-à-dire que le roc ne semble pas affecté par le processus de détérioration. Bien qu'on observe une hausse d'environ 1 point de JRC à la fin de l'expérience, le granite ne semble pas s'être détérioré au cours de la période de 2 mois. Cette hausse peut être attribuée à la forte dégradation du coulis de ciment qui est venue se déposer tout au long de l'essai. Ce dépôt était facilement identifiable à l'œil nu suivant la dégradation des interfaces. En ce qui a trait à la faible diminution du coefficient de rugosité initiale, cette dernière peut être liée à la dissolution d'éléments cimentaires qui étaient venus s'incruster sur la paroi rocheuse lors du processus d'injection du matériau.

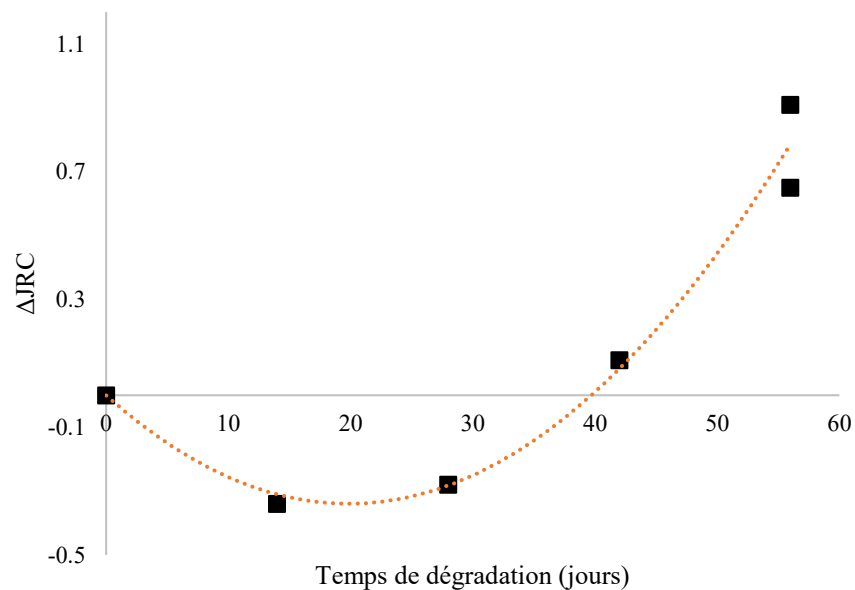


Figure 5.23 – Évolution des coefficients de rugosité des interfaces de roc pour une dégradation acide

5.5.4. Comparaison entre les matériaux

En somme, la rugosité d'interface des trois matériaux semble avoir évolué de façon différente. Que ce soit pour l'écoulement acide ou l'écoulement neutre, le roc ne semble pas affecté par les agents corrosifs tandis que le mortier subit une destruction initiale de sa microrugosité suivie d'une hausse de rugosité engendrée par l'exposition des grains de sable (silice) Tel. La rugosité du coulis de ciment semble toujours diminuée (en absolue) lorsque le dépôt de surface est enlevé. Le flux acide semble avoir démontré qu'il augmentait la cinétique de dégradation du coulis.

5.6. Résistance au cisaillement

Cette partie du mémoire présente les résultats en lien avec les essais de cisaillement direct effectués sur les éprouvettes de mortier-coulis et de roc-coulis. Dans un premier temps, les figures exposant la résistance au cisaillement des joints intacts ainsi que des joints dégradés durant 56 jours par écoulement neutre et acide sont présentées. Par la suite, les résultats issus de la dilataance des joints en lien avec des temps de dégradation identiques sont exposés. Il est important de noter qu'il n'est pas possible de présenter tous les résultats de cisaillements sous cette forme, c'est pourquoi ils ont été insérés en annexe C.

5.6.1. Résistance – Interface Béton-Coulis

La résistance au cisaillement d'une injection de coulis intacte est présentée par la figure 5.24 selon trois contraintes normales : 100, 200 et 300 kPa.

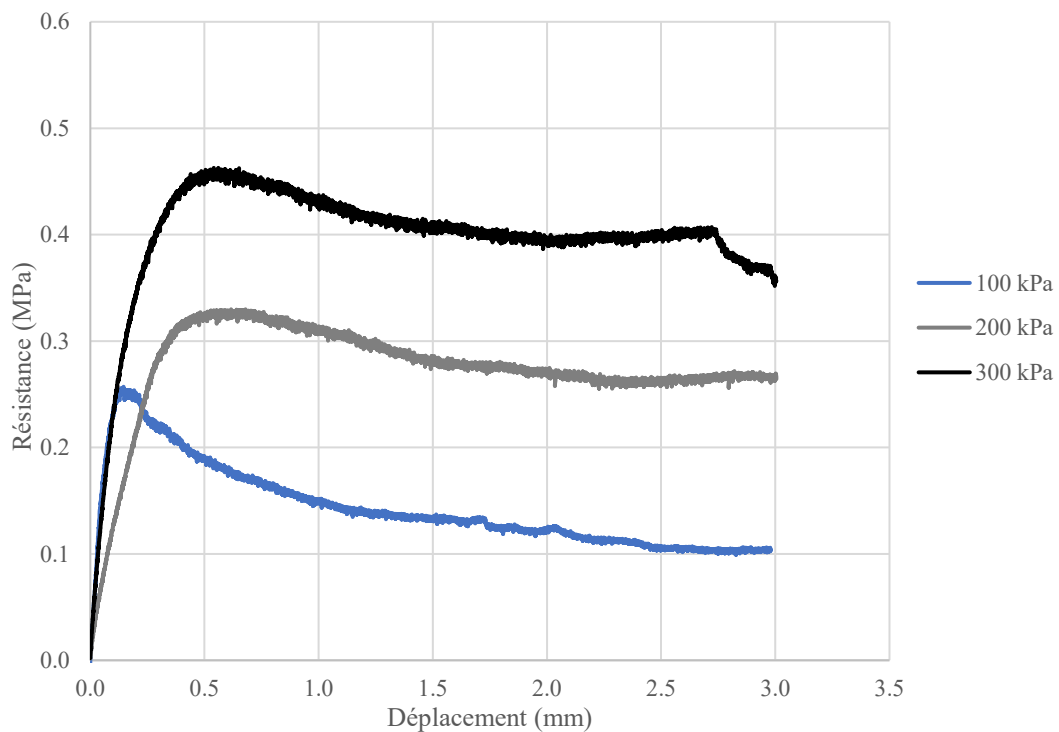


Figure 5.24 – Résistance au cisaillement d'un échantillon non dégradé

Le premier essai de cisaillement (100 kPa) affiche une résistance au pic prononcée qui ne se reproduit pas, ou très peu, dans les essais subséquents ce qui signifie que le processus a contribué

à l'endommagement d'une grande partie des aspérités. Effectivement, les résistances au pic des essais effectués à des contraintes normales de 200 et 300 kPa sont présentes, mais elles n'atteignent que des valeurs d'environ 30 à 50 kPa supérieures à leurs résistances résiduelles respectives. Les résistances résiduelles des trois essais sont respectivement de 120, 280 et 400 kPa pour le joint non dégradé.

Les résultats liés aux joints dégradés par un flux neutre durant 56 jours sont présentés à la figure 5.25.

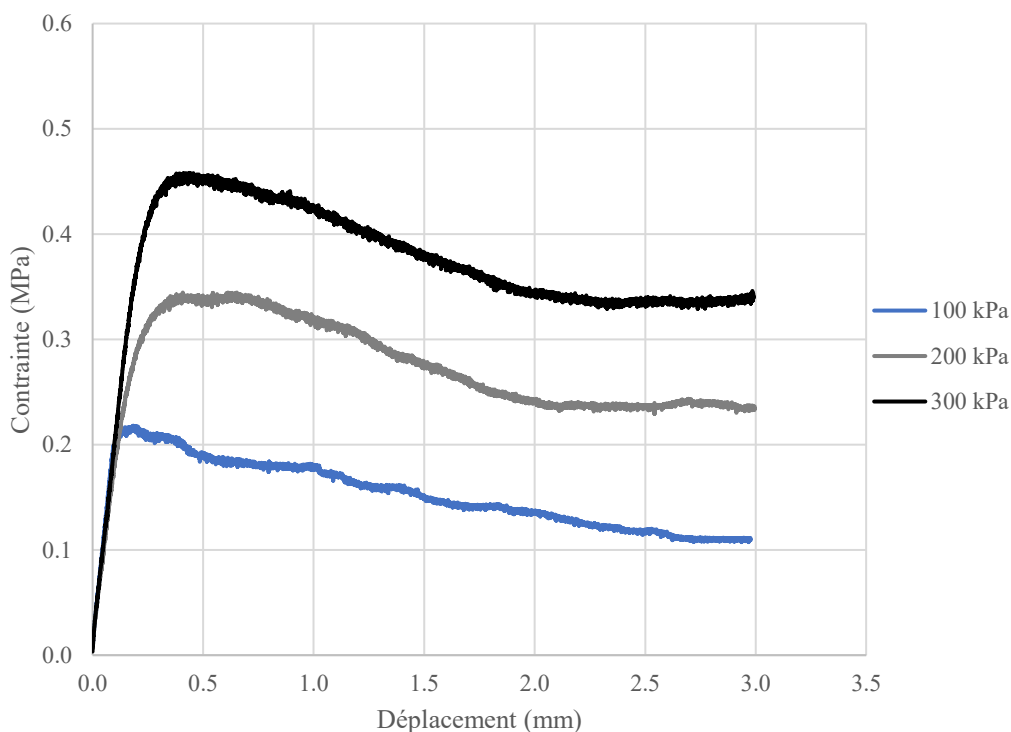


Figure 5.25 – Résistance au cisaillement d'un échantillon dégradé durant 56 jours avec de l'eau

Il est possible de voir que les résistances au cisaillement résiduelles présentées sont équivalentes à celles des interfaces non dégradées (140, 260 et 350 kPa). Cependant, les résistances au pic affichées par les trois essais ne montrent aucune évolution dans le comportement mécanique du joint lors de l'essai, c'est-à-dire que l'allure générale de la courbe demeure similaire pour les trois contraintes normales de cisaillement. Par conséquent, la dégradation par écoulement aurait contribué au lissage des aspérités. Autrement dit, suivant la dégradation par écoulement neutre, il resterait suffisamment d'aspérités pour engendrer une résistance au pic. Ces aspérités seraient

également suffisamment résistantes pour ne pas se rompre lors des essais effectués à des contraintes normales de 100, 200 et 300 kPa.

Les résultats de cisaillement issus de la dégradation acide montrent un comportement mécanique opposé (figure 5.26). Les courbes de résistance n'affichent aucun pic, et ce pour les trois contraintes normales appliquées. Par conséquent, la solution acide engendre une destruction complète des aspérités engendrant la perte de la résistance au pic des joints. La figure affiche plutôt une augmentation de la résistance jusqu'à l'attente d'un plateau résiduel. En ce qui concerne les valeurs résiduelles, elles sont moins élevées (120, 180, 280 kPa) que celles présentées par les figures 5.24 et 5.25 (interfaces non dégradées et dégradées 56 jours par flux neutre).

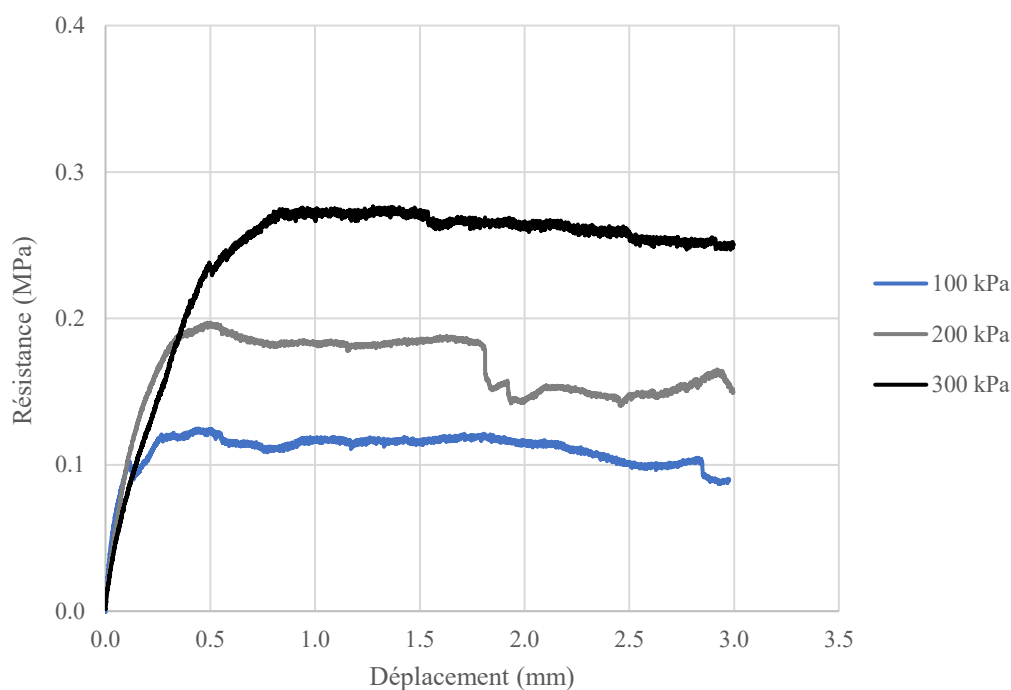


Figure 5.26 – Résistance au cisaillement d'un échantillon dégradé durant 56 jours avec de l'acide

5.6.2. Dilatance – Interface Béton-Coulis

Les résultats de la dilatance des joints permettent d'analyser de manière qualitative la destruction d'interface occasionnée par l'essai. Par exemple, lorsque le joint présente des aspérités de fortes amplitudes, on remarque généralement une grande différence de dilatance

entre les différentes contraintes normales appliquées, en raison de l'augmentation de cette contrainte, mais également du fait qu'une partie de ces aspérités sont endommagées durant le processus. La figure 5.27 expose la dilatance d'un joint non dégradé de mortier-coulis.

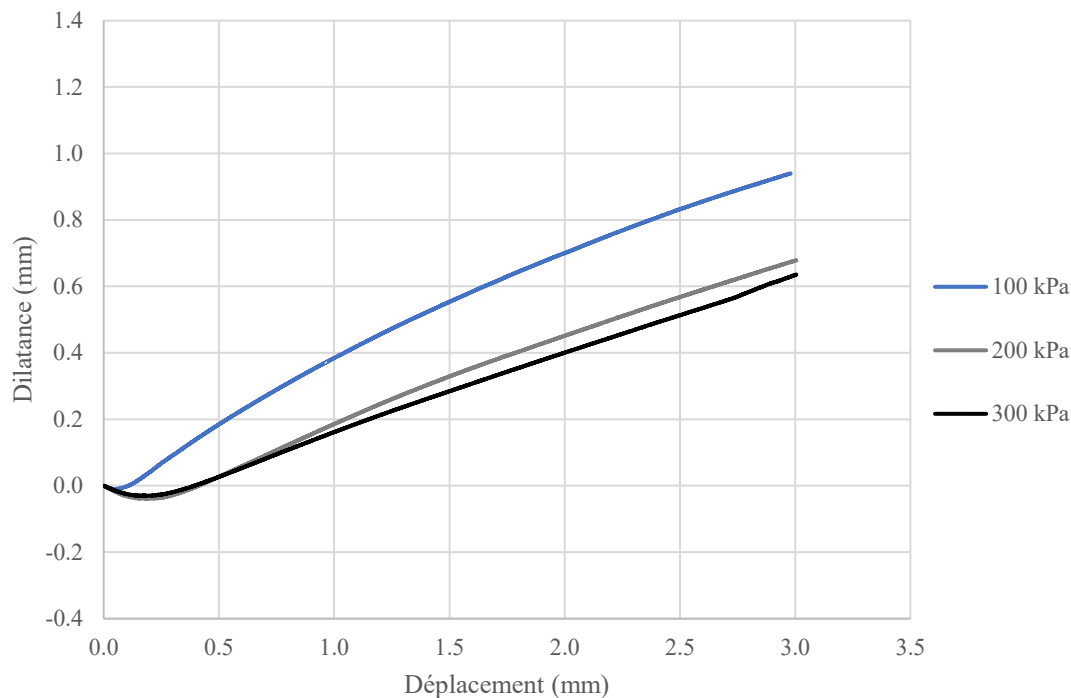


Figure 5.27 – Dilatance d'un échantillon non dégradé

Sur la figure, il est possible de constater que les dilatances finales (après 3 mm) sont respectivement de 0,95, 0,65 et 0,6 mm. On peut observer un grand écart de dilatance du joint entre l'essai à 100 kPa et celui de 200 kPa, indicatif de l'endommagement d'un grand nombre d'aspérités. La différence entre les deux derniers essais de cisaillement est minime, témoignant de quelques endommagements locaux de certaines zones de résistance.

La figure 5.28 expose les résultats de dilatance des joints dégradés par un écoulement neutre durant 56 jours. On y retrouve des valeurs de dilatance finales légèrement inférieures au joint intact. Effectivement, la dégradation ayant érodé aspérités les plus prononcées, il est normal d'observer une légère baisse de dilatance pour le premier essai (0,9, 0,8 et 0,7). Cependant, les différences observées entre les essais sont plus rapprochées démontrant une diminution de l'importance des aspérités dans le comportement mécanique du joint.

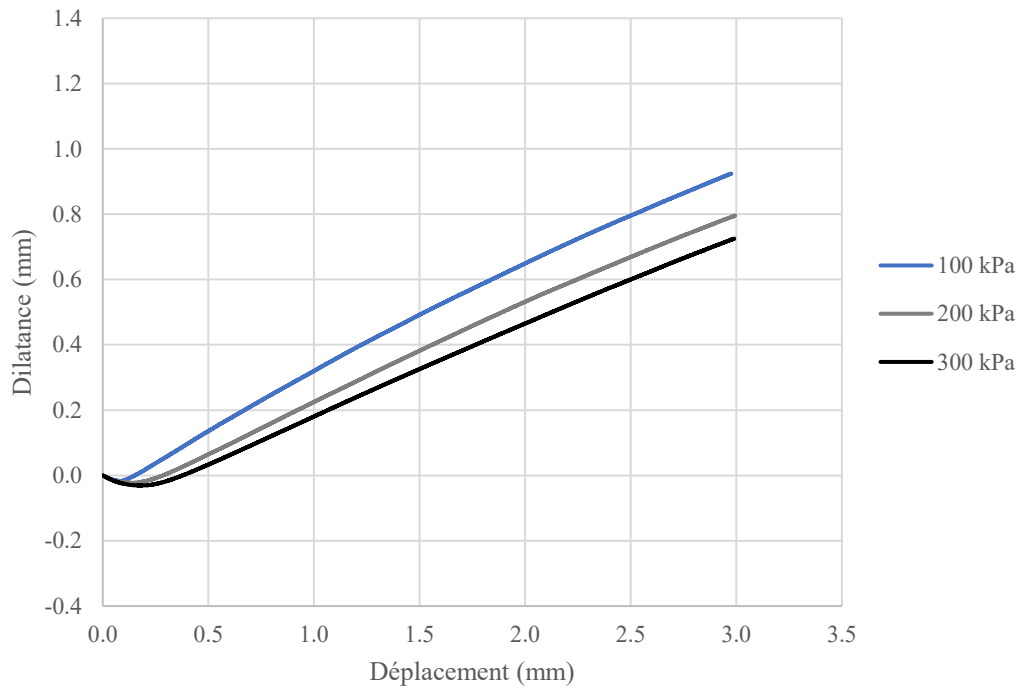


Figure 5.28 – Dilatance d'un échantillon dégradé durant 56 jours avec de l'eau

Finalelement, la figure 5.29 présente les résultats de dilatance des joints dégradés par un écoulement acide durant 56 jours.

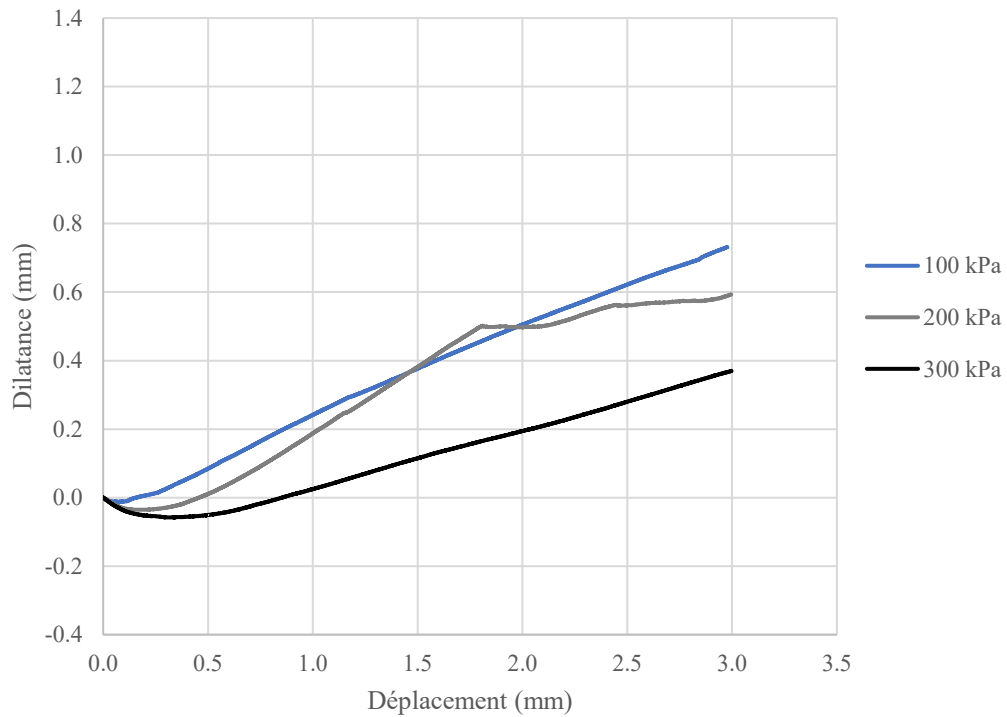


Figure 5.29 – Dilatance d'un échantillon dégradé durant 56 jours avec de l'acide

Cette fois-ci, il est possible d'observer des comportements différents des joints par rapport à ceux précédemment présentés, notamment au niveau du comportement mécanique. Les valeurs de dilatance varient entre 0,7, 0,6 et 0,4, ce qui est inférieur à celles obtenues pour les interfaces non dégradées et dégradées au flux neutre. De plus, on peut observer un écart significatif entre les différentes contraintes normales, et ce pour chaque essai. Il semble que la hausse de rugosité d'interface, liée à la dégradation par écoulement acide, présentée à la sous-section 5.6, ne contribue pas à l'augmentation de la résistance au cisaillement des joints. La figure 5.29 montre un endommagement des aspérités d'interfaces (grand écart entre les essais), cependant la dilatance globale est nettement inférieure au joint non dégradé, témoignant de la faiblesse de ces aspérités.

5.6.3. Résistance – Interface Roc-Coulis

Les interfaces de roc-coulis ont également été soumises à des essais de cisaillement. La figure 5.30 présente la résistance au cisaillement d'un joint non dégradé. Il est important de considérer que les interfaces roc-coulis ne présentent pas toutes des rugosités identiques, par conséquent il se peut qu'une certaine variabilité dans les résultats soit attribuable à ce dernier point.

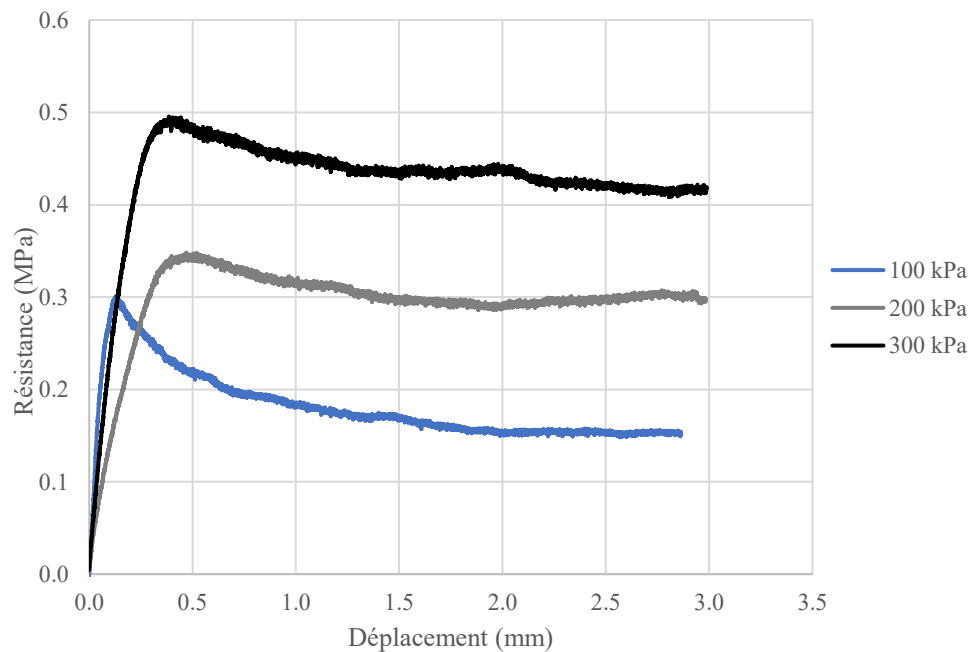


Figure 5.30 – Résistance au cisaillement d'un échantillon non dégradé

On observe les mêmes comportements mécaniques que pour l'interface mortier-coulis non dégradé, c'est-à-dire la présence d'une résistance au pic pour le premier essai (100 kPa) suivi d'une absence de pic liée à l'endommagement des aspérités pour les contraintes normales de 200 et 300 kPa. Les résistances résiduelles des trois essais sont respectivement de 180, 350 et 480 kPa pour le joint non dégradé.

La figure 5.31 expose la résistance au cisaillement d'une interface dégradée par écoulement neutre durant 56 jours.

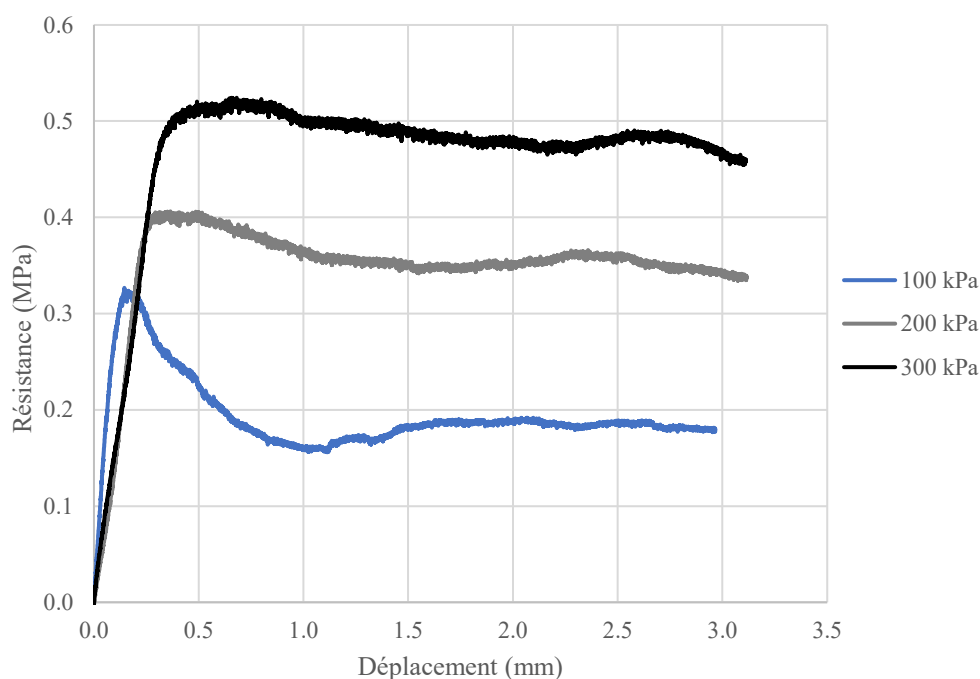


Figure 5.31 – Résistance au cisaillement d'un échantillon dégradé durant 56 jours avec de l'eau

Encore une fois, la résistance au cisaillement du premier essai affiche un pic prononcé. Ce dernier est toutefois presque inexistant pour les essais effectués à 200 et 300 kPa. Avec des valeurs résiduelles respectives 180, 360 et 480 kPa, il semble que la dégradation par flux neutre des échantillons roc-coulis n'ait que peu, voire pas du tout, affecté la résistance au cisaillement du joint. La section 5.5 indiquait que la rugosité rocheuse demeurerait inchangée après les 8 semaines de dégradation tandis que celle de coulis était minimalement atteinte. Par conséquent, l'écoulement à travers les fissures présentes dans un roc de type granitique d'un fluide neutre comme l'eau n'engendrerait que de faibles variations au niveau du comportement de

cisaillement d'un joint. Ces résultats sont à considérer avec prudence étant donné que les interfaces n'ont été dégradées que pendant une période de deux mois.

La dégradation accélérée à l'acide montre effectivement le contraire, soit aucune résistance au pic. La figure 5.32 indique que les tendances de dégradation ne sont pas similaires pour les deux fluides. Ce changement peut s'expliquer l'évolution des surfaces à travers la période de dégradation. Les interfaces de coulis soumis à un écoulement acide subissent de fortes variations dans leur rugosité d'interface, ce qui n'est pas le cas pour les surfaces rocheuses (sous-section 5.5). On assiste alors à un désemboîtement des surfaces. Par conséquent, la dégradation acide, qui aide à exposer les effets d'une dégradation à long terme, montre que la résistance au cisaillement d'une injection de coulis dans un roc granitique diminue de façon significative.

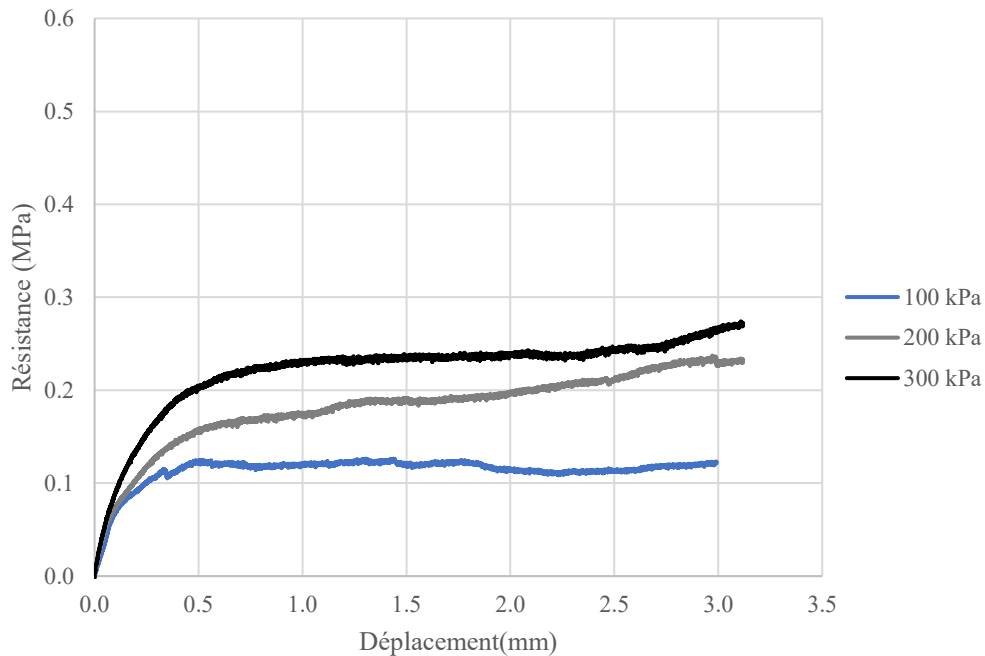


Figure 5.32 – Résistance au cisaillement d'un échantillon dégradé durant 56 jours avec de l'acide

Il est impossible d'observer de résistance au pic, et ce pour les trois essais. Les résistances résiduelles des essais affichent des valeurs de 120, 180 et 240 kPa, ce qui est nettement inférieur aux valeurs présentées dans les graphiques d'un joint non dégradé ou d'un joint dégradé par flux neutre.

5.6.4. Dilatance – Interface Roc-Coulis

Les amplitudes des dilatances obtenues dans cette sous-section ne peuvent pas être comparées étant donné que les joints n'étaient pas similaires. Il est toutefois possible d'analyser la dilatance de chaque joint par rapport aux trois essais effectués à 100, 200 et 300 kPa de contrainte normale. La figure 5.33 expose la dilatance d'un joint non dégradé de roc-coulis.

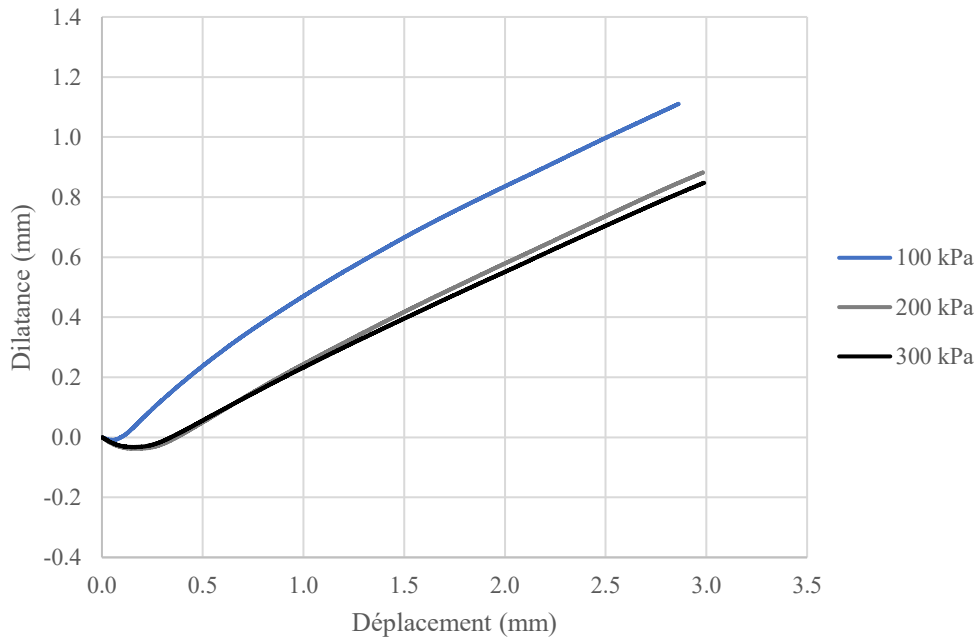


Figure 5.33 – Dilatance d'un échantillon non dégradé

La dilatance du joint non dégradé montre que le premier essai de cisaillement a contribué à l'endommagement d'un grand nombre d'aspérités, tendance qui ne semble pas s'être reproduite par les essais subséquents. On peut le voir entre autres par le faible écart de dilatance entre les essais 2 et 3 qui affichent des courbes presque confondues. La figure 5.33 confirme la forte résistance maximale montrée par la figure 5.30.

La figure 5.34 expose la dilatance d'un joint dégradé par écoulement neutre pour une période de 56 jours. On remarque une évolution constante de la dilatance avec l'augmentation de la contrainte normale. Le joint présente un comportement mécanique similaire au joint mortier-coulis dégradé par le même fluide. On observe alors une rupture plus graduelle des aspérités tout au long de l'expérience.

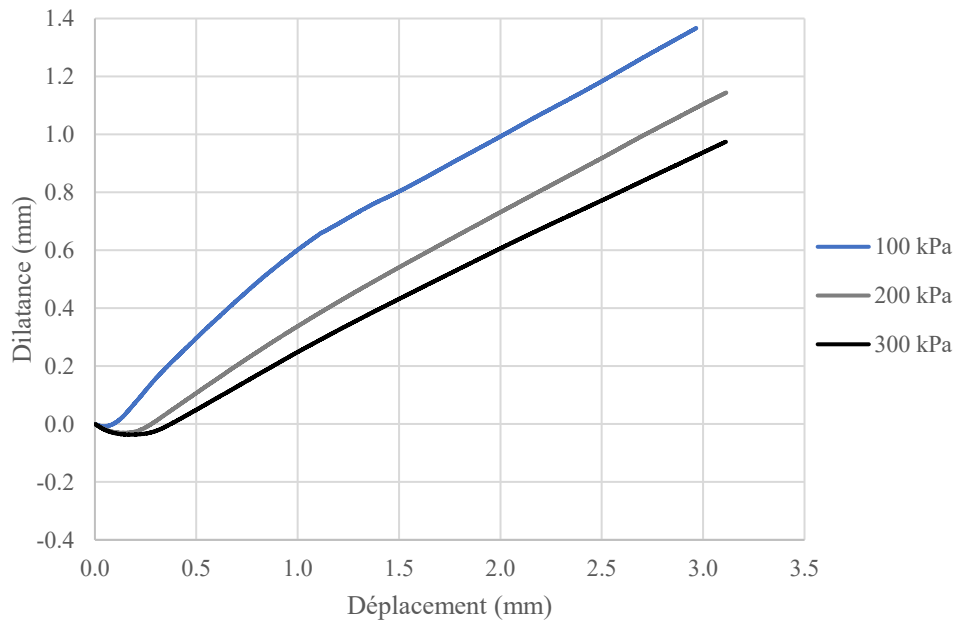


Figure 5.34 – Dilatance d'un échantillon dégradé durant 56 jours avec de l'eau

La figure 5.35 expose la dilatance d'un joint dégradé par un flux acide pour une période de 56 jours. Cette fois-ci, les valeurs confirment la destruction d'interface qui avait été identifiée à la figure 5.32.

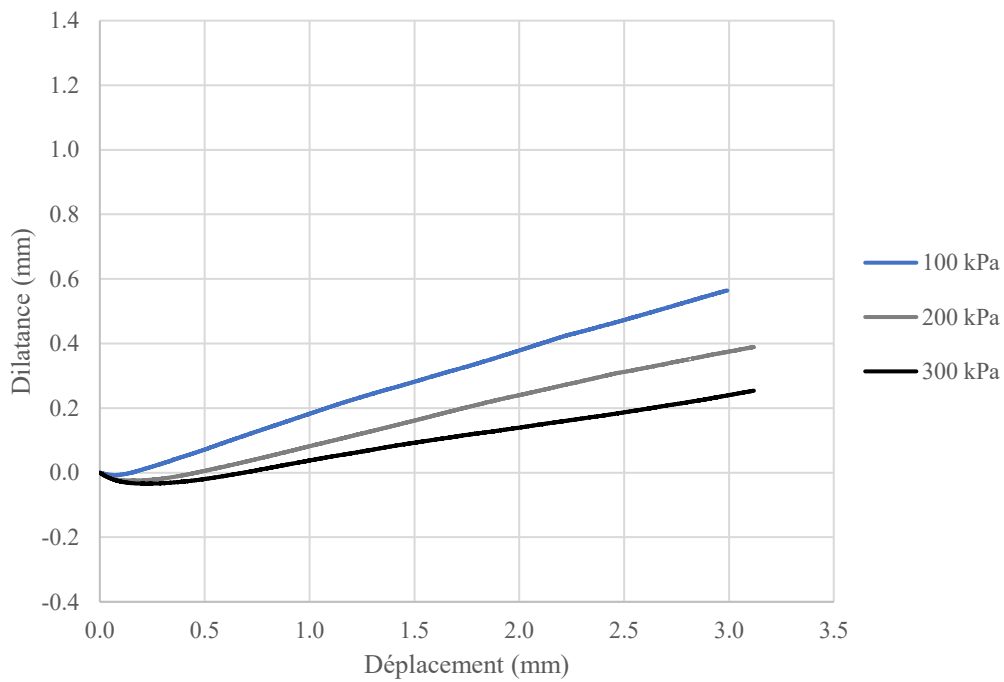


Figure 5.35 – Dilatance d'un échantillon dégradé durant 56 jours avec de l'acide

On remarque entre autres que les tendances affichées par les trois essais sont similaires. L'écart présent entre les essais semble plutôt, par sa constance, lié à l'augmentation de la contrainte normale plutôt qu'au cisaillement des aspérités. Finalement, les valeurs de dilatance affichée tout au long du processus sont relativement faibles, synonymes d'une mauvaise cohésion ou d'une rugosité d'interface faible.

5.6.5. Comparaison entre les joints et conclusions des essais de cisaillement

En somme, malgré le fait que le coulis de ciment ait été injecté dans deux matériaux différents (le mortier pour imiter le béton ainsi que le granite), il semble que les joints ayant subi des détériorations similaires adoptent des comportements mécaniques semblables.

Les joints intacts présentaient les plus fortes résistances au cisaillement par rapport à leurs homologues dégradés. L'essai réalisé à une contrainte normale de 100 kPa affichait une résistance au pic prononcée qui n'était pas observé par la suite (contraintes normales plus élevées). Les échantillons dégradés par écoulement neutre présentaient des résultats légèrement inférieurs à ceux des interfaces non dégradées. L'érosion des aspérités pouvait être observée sur les graphiques par la présence de faible résistance au pic et par l'évolution constante de la dilatance entre les essais. Les résultats entourant les interfaces dégradées par un flux acide convergeaient vers l'endommagement marqué de la rugosité des interfaces cimentaires. On pouvait observer une grande perte de résistance au cisaillement et de dilatance associée à la perte de contact entre les interfaces composants le joint (les deux interfaces ne se dégradent pas à la même vitesse).

Finalement, il semblerait que les suppositions entourant la dégradation soient en partie validées par les résultats des essais de cisaillement. L'évolution mécanique des joints affiche une légère dégradation d'interface pour les discontinuités dégradées par l'eau et une dégradation beaucoup plus prononcée pour les interfaces détériorées par écoulement acide, ce qui était l'objectif initial du processus expérimental. À la lumière de ces résultats, on peut voir que la dégradation acide semble accélérer le processus de dégradation. Il est toutefois trop tôt pour associer un ratio multiplicateur pour la dégradation des joints en conditions accélérées.

5.7. Enveloppe de rupture selon Mohr-Coulomb

Cette sous-section constitue présentent les derniers résultats en lien avec cette étude, les enveloppes de rupture résiduelles associées à la théorie de Mohr-Coulomb. Cette partie du document inclut également tous les intervalles de dégradation en lien avec les essais afin d'analyser l'ensemble de l'évolution des joints sur la résistance au cisaillement : T₀, T₁₄, T₂₈, T₄₂, T₅₆.

5.7.1. Interface Béton-Coulis

La figure 5.36 expose les enveloppes de ruptures des joints de mortier-coulis qui ont été dégradés par écoulement neutre. Le graphique témoigne d'une évolution différente à celles supposées initialement (décroissance globale) de la résistance au cisaillement des joints selon le temps. Il est possible de voir entre autres que le témoin présente la valeur de cohésion apparente la plus faible après quoi, les cohésions apparentes des interfaces dégradées semblent diminuer. Cette tendance peut s'expliquer par entre autres par la cure des échantillons. Cette dernière s'étant effectuée sur 7 jours, il semblerait que les surfaces se solidifient encore un peu avec le temps (14 jours) pour ensuite se dégrader (après 14 jours). L'hypothèse est que la degra-

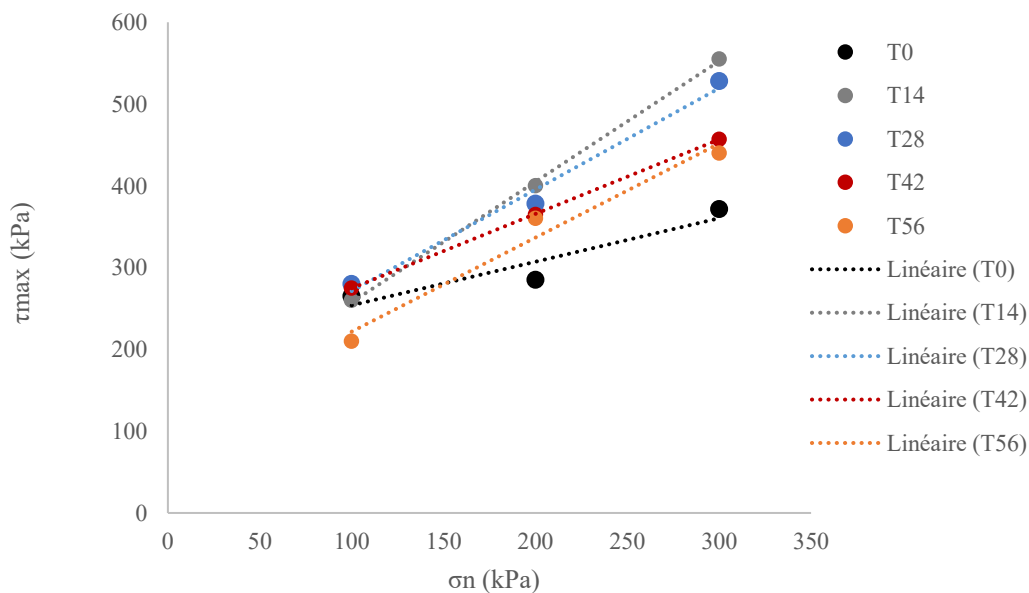


Figure 5.36 – Enveloppe de rupture selon M-C pour des échantillons dégradés à l'eau durant 0 à 56 jours

dation d'interface aurait continuer en ce sens (perte de résistance) avec le temps. La valeur de cohésion apparente maximale (220 kPa) a été obtenue avec l'échantillon non dégradé. Les cohésions des échantillons dégradées varient de 200 à 100 kPa selon le temps de détérioration. En ce qui a trait aux angles de frottement, ces derniers semblent similaires pour les joints ayant subi une dégradation (27°) et légèrement inférieurs pour le joint intact (43°). La résistance au cisaillement de cette discontinuité est plutôt axée sur la cohésion apparente.

La figure 5.37 expose les enveloppes de ruptures des joints mortier-coulis ayant été soumis à un flux acide. On observe cette fois une enveloppe de rupture maximale définie par le témoin suivi d'une diminution des critères suivant le temps de détérioration.

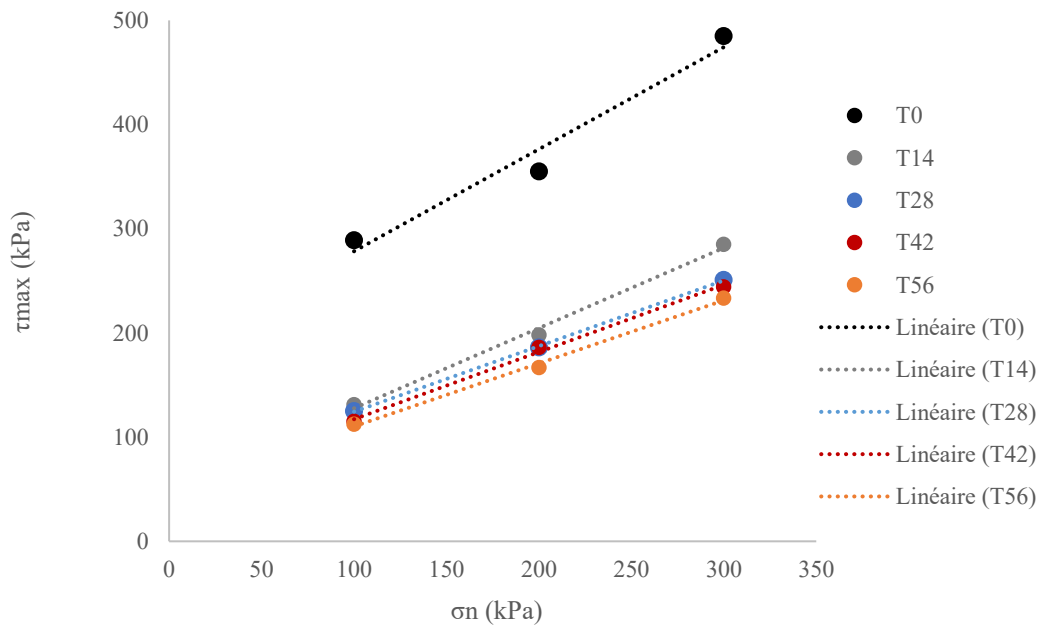


Figure 5.37 – Enveloppe de rupture selon M-C pour des échantillons dégradés à l'acide durant 0 à 56 jours

Étant donné que le graphique affiche des angles de frottement similaires pour les différentes éprouvettes, on assiste alors à une réduction de la cohésion, et ce dès les premières semaines de dégradation. La cohésion apparente atteint une valeur initiale de 220 kPa, pour diminuer fortement jusqu'à des valeurs de 110 à 90 kPa selon l'évolution de la dégradation acide. On observe également une tendance de dégradation globale étant donné que les éprouvettes réagissent mécaniquement de la même façon. On parle ici d'une variation de la cohésion apparente par rapport à un angle de frottement qui semble rester stable.

5.7.2. Interface Roc-Coulis

Pour les interfaces roc-coulis dégradées par écoulement neutre, on remarque une tendance similaire dans l'organisation des enveloppes de rupture selon le temps de détérioration d'interface (figure 5.38). On remarque que l'enveloppe de rupture du joint dégradé durant 42 jours est la plus élevée en termes de cohésion apparente (300 kPa), ce qui est attribuable à la rugosité plus élevée du joint de cette éprouvette. On observe premièrement que l'enveloppe de rupture correspondant au témoin semble encore une fois définir le critère maximal, même si la différence avec celle de 14 jours est minime. En règle générale, les cohésions apparentes varient de 220 kPa à 100 kPa pour une dégradation de 56 jours.

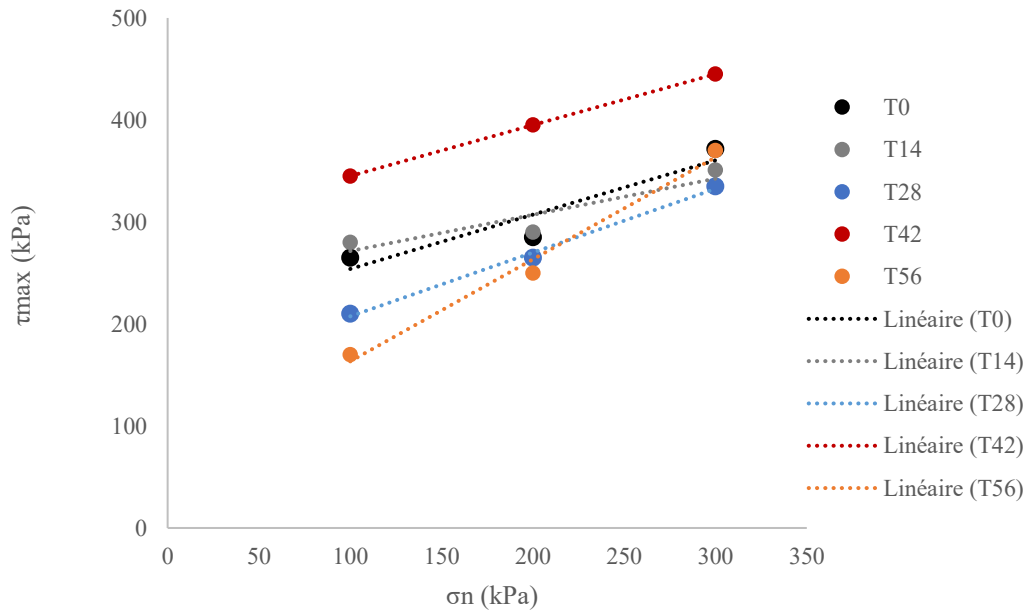


Figure 5.38 – Enveloppe de rupture selon M-C pour des échantillons dégradés à l'eau durant 0 à 56 jours

La figure 5.39 expose les enveloppes de ruptures de joints roc-coulis ayant été dégradés par flux acide. Leur évolution avec le temps de dégradation affiche une tendance similaire aux joints mortier-coulis. On peut voir encore une fois que le témoin présente la plus forte valeur de cohésion apparente (200 kPa) tandis que les interfaces dégradées affichent des cohésions nettement inférieures variant de 110 à 90 kPa témoignant d'une réduction des propriétés

mécanique et morphologique du joint. Rappelons que la méthode de fabrication de ce type d'échantillon ne permet pas de créer de lien entre les différents angles de frottement puisque les échantillons ne sont pas identiques.

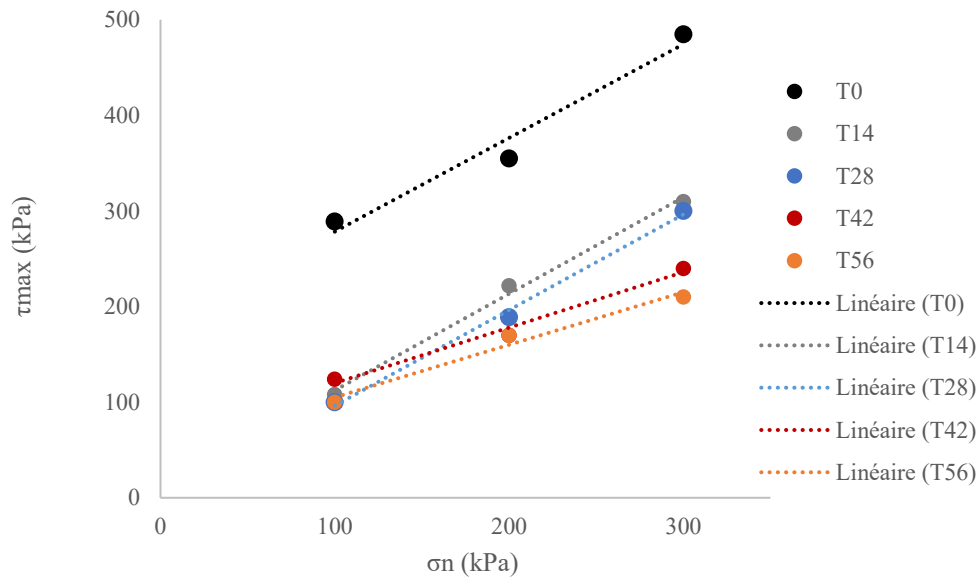


Figure 5.39 – Enveloppe de rupture selon M-C pour des échantillons dégradés à l'acide durant 0 à 56 jours

6. Discussion et recommandations

Ce chapitre présente sommairement les résultats obtenus ainsi que les tendances de dégradation des interfaces de coulis cimentaire injectés dans le béton et dans le roc. Par la suite, cette partie du document effectue une brève remise en question du processus expérimental employé en exposant un comparatif des conditions de dégradations réelles et des conditions utilisées. En ce sens, une sous-section inclut certaines modifications du projet qui auraient pu être effectuées en amont du projet. Il est important de noter que des recommandations liées à ce sujet respectives sont apportées dans chaque section.

6.1. Résultats obtenus et recommandations

Les résultats présentés dans le chapitre 5 peuvent se diviser en trois parties définissant des objectifs distincts. La première partie concernait les arguments pouvant prouver que les facteurs de dégradations utilisés étaient majoritairement dissolution et l'érosion mécanique des interfaces. La seconde partie, reproductibilité des échantillons, permettait d'attester de la validité des données obtenues sur un échantillon. Étant donné que la reproductibilité des échantillons a déjà été validée à la section 5.4, ces résultats ne seront pas discutés ici. La troisième partie a pour objectif de définir l'évolution des interfaces dégradées en employant des méthodes qualificatives (JRC) ainsi que des essais définissant les propriétés mécaniques des joints par essai de cisaillement direct.

6.1.1. Facteurs de dégradation

Les analyses effectuées dans le cadre de la définition des facteurs de dégradation étaient l'analyse par MEB des échantillons, l'analyse par DRX du dépôt de surface engendré par la détérioration acide ainsi que l'analyse par ICP de la solution acide. Ces analyses ont été effectuées afin de dissiper plusieurs doutes notamment au niveau de la dégradation acide. Ces interrogations en lien avec la dégradation accélérée survenaient au niveau de l'ajout de certains phénomènes de dégradations. Effectivement, les dégradations chimiques entourant le vieillissement des matériaux cimentaires étant nombreuses (réaction alcalis-granulats, carbonatation, ettringite différée, etc.), un mauvais choix au niveau des éléments composant la

solution aurait pu entraîner un de ce phénomène. L'objectif de la dégradation accélérée par diminution du pH était initialement d'augmenter la cinétique de détérioration. Par conséquent, selon les résultats obtenus par ces essais en laboratoire (sections 5.1, 5.2 et 5.3), les types de dégradations effectuées sont définis par la dissolution lié au pH, ainsi que par l'érosion mécanique liée à la vitesse de l'écoulement. Aucune forme de détérioration non contrôlée n'a pu être observée. On parle ici par exemple de réaction de carbonatation, de sulfatation, la présence d'ettringite différée, qui auraient pu également affecter la cinétique de dégradation des matériaux cimentaires.

6.1.2. Comportements des interfaces de coulis de ciment

Les interfaces de coulis de ciment ont présenté une évolution face à la dégradation par écoulement assez prévisible, c'est-à-dire que la résistance au cisaillement diminuait avec le temps, et ce pour les deux fluides. Encore une fois, la dégradation acide engendrait une destruction beaucoup plus rapide des interfaces, diminuant ainsi la résistance au cisaillement des joints plus rapidement que le flux neutre. Cependant, certains aspects intrigants ont été observés au cours de l'expérience :

- La hausse de résistance au cisaillement des joints ayant été soumis à un écoulement neutre;
- La hausse de rugosité des interfaces de coulis ayant subi une dégradation acide;
- Le dépôt de surface engendré par la dégradation acide du coulis de ciment.

Premièrement, la hausse de résistance au cisaillement présentée par les figures 5.36 et 5.38 qui affichent respectivement les enveloppes de ruptures des joints dégradés par écoulement neutre de mortier-coulis et de roc-coulis. La cure de 7 jours ne semble pas avoir été suffisante pour les interfaces de mortier et de coulis de ciment; il semble qu'initialement l'écoulement du fluide neutre agisse en tant que cure humide supplémentaire. On peut voir une augmentation de la résistance dans les 14 à 28 premiers jours, ce qui correspond au temps de cure généralement nécessaire au matériau cimentaire pour atteindre leur pleine résistance mécanique. La supposition est qu'une cure de 28 jours sur toutes les interfaces aurait contribué à une tendance différente. Autrement dit, la dégradation par écoulement neutre aurait contribué à la diminution

des résistances au cisaillement des joints. On aurait alors observé une tendance similaire à celle affichée par la figure 5.37, de plus faible valeur.

Comme montré par la figure 5.19 l'évolution des coefficients de rugosité est positive après 14 jours de dégradation acide. Cette hausse, d'environ 1 point, observée seulement sur les interfaces de coulis cimentaire des joints mortier-coulis correspond à l'augmentation de la porosité d'interface affichée par la figure 5.5. Il semblerait que la dissolution acide de la matrice cause suffisamment de cavités pouvant être enregistrées au profilomètre laser. Cependant, cette tendance ne contribue pas à l'augmentation de la résistance au cisaillement des joints. Les enveloppes de ruptures de Mohr-Coulomb définies par la figure 5.37 témoignent d'une diminution de la résistance au cisaillement des joints avec le temps de dégradation. Par conséquent, l'augmentation de la rugosité d'interface enregistrée serait liée au dépôt de surface qui n'aurait aucune corrélation directe avec l'augmentation de la résistance au cisaillement. Bien au contraire, la dégradation acide des interfaces de coulis de ciment contribue à l'affaiblissement accéléré des surfaces.

En ce sens, le troisième point sortant de l'analyse des résultats correspond au dépôt de surface identifié sur les surfaces de dégradation. L'interrogation se situe au niveau de son utilité dans cette étude. Sa présence contribue à augmenter le coefficient de rugosité (tableau 5.2). Cependant dans l'absolue, le dépôt ne contribue aucunement à l'augmentation de la résistance au cisaillement, bien au contraire. Tel que montré par [61], un dépôt de surface peut contribuer à la lubrification des joints pour ainsi réduire la résistance au cisaillement. Par conséquent, le dépôt présent sur les interfaces de coulis dégradés à l'acide a vraisemblablement contribué à la diminution des résultats de résistance au cisaillement. Étant donné que la présence de ce dépôt n'a pas été observée sur les joints roc-coulis, la supposition est qu'une dissolution plus agressive des interfaces ne laisse pas le temps au dépôt de se former. Par conséquent, afin d'obtenir des résultats moins variables il faudrait de retirer le dépôt de surface suivant la dégradation acide.

6.1.3. Variabilité des résultats

Une certaine variabilité des résultats a pu être observée, notamment au niveau de l'évolution de la rugosité des interfaces de coulis de ciment ainsi que sur la résistance au cisaillement de joints de rugosité identique ayant été soumis à des conditions de dégradations similaires.

En ce qui a trait à la résistance au cisaillement des essais, la variabilité est causée par l'essai en lui-même. Afin de s'appuyer sur des résultats, il est nécessaire d'observer la figure 5.25 ainsi que les figures C13 et C15 de l'annexe. Bien que la majeure partie des variations de résistance au cisaillement soit due au temps de dégradation des interfaces, une certaine variabilité peut être observée dans les résultats exposés par ces figures. On y trouve par exemple des résistances au cisaillement pour une contrainte normale de 300 kPa variant de 400 à 500 kPa, et ce, pour des interfaces identiques ayant été soumises aux mêmes dégradations.

Par la suite, une des variations les plus intrigante des résultats se situe au niveau des tendances affichées par l'évolution de la rugosité des interfaces de coulis. La figure 5.19 montre que le JRC du coulis présent aux interfaces de mortier présente une augmentation avec le temps de dégradation, tandis qu'on observe l'inverse pour le coulis présent dans les joints rocheux. La supposition ici étant que la tendance positive des joints mortier-coulis est aberrante et que celle des joints rocheux est bonne. Tel qu'il a été présenté précédemment, cette augmentation de rugosité provient du dépôt de surface et que lorsqu'il est retiré, la rugosité d'interface suit une tendance négative. Ce dépôt n'est pas présent sur le coulis des interfaces rocheux étant donné que la dissolution du joint se concentre sur l'interface de coulis de ciment (sous-section 5.5.1).

6.2. Dégradation par écoulement et recommandations

Le processus expérimental ainsi que le montage et les éprouvettes ont été conçus en laboratoire et sont propres à cette étude. Cependant, certaines interrogations demeurent quant à la comparaison entre la dégradation en laboratoire et la dégradation réelle des joints de coulis cimentaire. De plus, il est intéressant de se questionner sur le processus expérimental quant à la

validité des essais, de proposer des choix expérimentaux qui auraient pu être plus efficaces ou plus appropriés ainsi que de définir les limites du projet.

6.2.1. Théorie vs réalité

Certaines interrogations au niveau du processus de dégradation réel sont survenues au cours de la présente étude. Pour rappel, les échantillons sont installés dans des boîtiers de dégradation étanches qui contrôlent la direction interne que prend l'écoulement. Pendant une période de 8 semaines, ces éprouvettes subissent continuellement cet écoulement, ce qui fait en sorte que la surface est toujours en contact avec le fluide subissant ainsi l'érosion et la dissolution.

Les interrogations quant à ce processus de détérioration suggèrent que certains joints présents dans un contexte d'ouvrages hydrauliques ne sont pas continuellement soumis à un écoulement. Ces joints auraient plutôt tendance à emprisonner de l'eau stagnante ou très peu mobile. Effectivement, les fissures dans les barrages ne sont pas toujours soumises à de fortes pressions internes. Une mauvaise injection dans les fondations causant des poches d'air peut également avoir engendré une quelconque rétention d'eau. Par conséquent, le facteur érosif exploré dans ce projet ne serait pas admissible dans la définition de la détérioration d'interface pour ces discontinuités. De plus, sans apport externe, l'eau stagnante perd de sa capacité corrosive avec le temps. Initialement, cette eau possédant un certain pH engendre une dissolution d'interface. Les ions OH^- issus de l'interface de coulis contribue à la basification de l'eau, rendant le fluide non corrosif à long terme. Bien entendu, dans la mesure où il y aurait un faible renouvellement de cette eau (apport externe), la cinétique de dissolution pourrait s'apparenter (un peu plus faible) à celles observées pour les coulis injectés dans cette étude. Dans l'absolu, de l'eau stagnante présente dans les joints injectés serait moins dommageable qu'un écoulement. À l'inverse, certains joints présents dans les fondations peuvent être soumis à de forte pression engendrée par le bassin de rétention. Dans ce cas précis, le facteur érosif serait plus élevé, la dissolution plus faible, cependant la dégradation globale que ce qu'on a pu évaluer dans cette étude. Par conséquent, il est important de considérer que cette étude a évalué en laboratoire la cinétique de dégradation des interfaces de béton-coulis et de roc-coulis par écoulement continu à pressions faibles (20-30 kPa).

De plus, il aurait été intéressant de comparer de réels joints de coulis de ciment injectés dans le béton et dans le roc pour analyser les types de dégradation auxquels ils ont été soumis, ainsi que pour connaître leurs propriétés mécaniques. De cette façon, il aurait été possible de comparer ces interfaces avec celles modifiées en laboratoire afin d'obtenir une ou des relations temporelles empiriques. Ce type de relations pourrait s'avérer utile pour la reproduction en laboratoire d'interfaces dégradées qui pourraient permettre d'obtenir de manière non destructive des données parallèles au vieillissement des barrages.

6.2.2. Méthodologie utilisée

Comme établi précédemment, la partie expérimentale n'inclut pas la totalité des processus de dégradations, c'est-à-dire qu'elle ne considère que la dégradation par écoulement uniforme et constant. De plus, les détériorations causées par l'érosion et la dissolution ne sont pas analysées séparément. Par conséquent, il est impossible de quantifier les dégradations causées uniquement par l'érosion ou la dissolution. Afin d'inclure un maximum de cas de dégradation possible, il aurait été intéressant de modifier le protocole expérimental pour inclure la détérioration d'interface uniquement par érosion ainsi qu'uniquement par dissolution.

Une dégradation causée à 100% par l'érosion ne peut théoriquement pas se produire. Effectivement, pour ce faire, le facteur dissolutif de l'écoulement doit être nul, ce qui veut dire que le pH de l'écoulement devrait être autour de 13-14. Cependant, les données issues de cette manipulation auraient pu permettre de témoigner de la portion de la dégradation causée par la vitesse ainsi que par la pression de l'écoulement. L'essai effectué à différentes pressions aurait pu mener à l'élaboration d'une charte empirique de la dégradation érosive d'interface.

En ce qui a trait à la dégradation purement dissolutive, cette dernière aurait pu être divisée en deux parties. La première portion de l'essai aurait été de soumettre les interfaces de coulis à de l'eau ou à un fluide plus acide, stagnant stabilisé toujours au même pH afin d'établir l'impact de dissolution d'interface.

En parallèle, des interfaces de coulis soumis à un fluide stagnant non stabilisé, pour imiter la rétention d'eau engendrée par une mauvaise injection, auraient pu être effectuées. Les derniers points constituent des pistes d'amélioration au projet. De cette façon, il aurait été possible d'effectuer des manipulations basées sur les résultats obtenus afin comparer les dégradations théoriques avec les dégradations réelles, ou du moins dans leurs conditions réelles.

6.3. Résumé des recommandations

Des recommandations ont été formulées sur les plans du processus expérimental, de l'obtention des résultats ainsi que de l'analyse des résultats.

Pour le processus expérimental :

- Ajouter des séries d'éprouvettes pour définir la dégradation engendrée uniquement par l'érosion de l'écoulement sous différentes pressions;
- Ajouter des séries d'éprouvettes pour définir la dégradation engendrée uniquement par la dissolution à différents pH (5 et 7);
- Ajouter des séries d'éprouvettes pour définir la dégradation engendrée par de l'eau stagnante (fluide non stabilisé).

Pour l'acquisition de données :

- Brosser finement le dépôt d'interface sur les surfaces de coulis de ciment;

Pour l'analyse des résultats :

- Examiner des carottes prélevées dans des joints injectés de béton et de roc pour pouvoir établir une comparaison qualitative et numérique des dégradations.

7. Conclusion

Ce projet de recherche a employé des éprouvettes ainsi qu'un montage d'écoulement de dimensions uniques. Cet aspect a entraîné la possibilité de confectionner les échantillons représentant le plus fidèlement possible les interfaces d'une fissure dans le béton d'un barrage ou encore une fracture dans les fondations rocheuses. L'objectif étant d'obtenir des résultats le plus près possible de la réalité afin d'analyser l'effet des paramètres constituant le vieillissement sur l'état de détérioration des joints (rugosité) ainsi que sur les propriétés mécaniques (résistance au cisaillement) des réparations de coulis dans les joints rocheux ou dans les fissures de béton. Pour ce faire, le projet a dû répondre aux sous-objectifs suivants :

- Identifier les principaux paramètres constituant la dégradation des joints;
- Développer un modèle d'éprouvettes pouvant être soumises à un écoulement constant et présentant une rugosité similaire aux joints rocheux et aux fissures dans le béton;
- Développer un montage pouvant soumettre (en accélérer) les éprouvettes à des conditions similaires que les fondations rocheuses des barrages;
- Choisir un protocole d'essais après dégradation afin de qualifier et de quantifier le vieillissement après l'expérimentation.

Les résultats issus de ce travail expérimental ont premièrement montré que les dégradations engendrées par l'écoulement de fluides étaient bel et bien gouvernées par les facteurs d'érosion et de dissolution d'interface. Deuxièmement, les essais effectués sur les échantillons de reproductibilité ont indiqué que les variabilités de chaque échantillon étaient minimales. Troisièmement, les résultats en lien avec les 4 séries de dégradation (mortier-coulis neutre et acide, roc-coulis neutre et acide) aboutissent aux conclusions suivantes :

- La résistance au cisaillement des interfaces diminue selon le temps d'exposition à l'écoulement, et ce pour les deux fluides;
- La dégradation d'interface engendrée par l'acide constitue une accélération de la dégradation par écoulement neutre proposant des mécanismes de dégradation similaire;

- La hausse de rugosité engendrée par certaines dégradations n'est pas synonyme d'augmentation de la résistance à la rugosité, mais plutôt d'augmentation de la porosité d'interface affaiblissant ainsi la discontinuité.

Les retombées potentielles du projet sur le plan de l'expertise des barrages sont:

- D'établir un protocole complexe pouvant définir la dégradation du coulis cimentaire injecté dans différents matériaux;
- D'initier des réflexions sur la possibilité des réhabiliter les ouvrages concernés ou de changer les matériaux et/ou formules dans les dimensionnements;
- Pouvoir recréer une interface ayant subi un vieillissement sans détruire les ouvrages, et ce, sur un court laps de temps.

À la vue des résultats obtenus, il est clair que les propriétés mécaniques du coulis de ciment employé sont affectées à la baisse par le passage d'un écoulement d'eau. L'utilisation des coulis cimentaires devrait être reconsidérée pour les injections dont la résistance au cisaillement des interfaces est sollicitée (certains types de boulons d'ancrages). Bien que les essais effectués dans le cadre de cette étude considèrent des joints non-étanche via le décollement entre le matériel injecté et le coulis, le temps d'effectivité des coulis cimentaire ayant pour objectif d'imperméabiliser les ouvertures des massifs rocheux (ou des fissures des barrages) devrait être réévalué.

Finalement, ce projet qui s'est effectué a permis de développer un nouvel axe de recherche en lien avec la dégradation des joints rocheux injectés qui pourra être influencée par sur les conclusions issues de ce projet.

8. Références

1. Hydro-Québec. 2010. *Hydro Québec*. See <http://www.hydroquebec.com/comprendre/hydroelectricite/ouvrages-retenu.html> (accessed on 2 June 2017).
2. Gouvernement du Canada. 2017. *Portail Québec. - Serv. Économiques*. See <http://www.gouv.qc.ca/FR/LeQuebec/Pages/Economie.aspx> (accessed on 2 June 2017).
3. Nicolet R, Conseil executif. 1997 Rapport de la Commission scientifique et technique sur la gestion des barrages. , 350.
4. Gouvernement du Québec. 2002 Règlement sur la sécurité des barrages. -3101 R-1.
5. Seisme Canada. 2016. *Seisme Canada*. See <http://www.seismescanada.rncan.gc.ca/zones/eastcan-fr.php> (accessed on 2 June 2017).
6. Schrader EK. 1999 Shear strength and lift joint quality of RCC. , 46–55.
7. Brown EL, Charalambakis S, Crepeau PM, François P. 1970 Les fondations du barrage Daniel-Johnson (Manicouagan 5). pp. 631–650. Montréal: Commission Internationale Des Grands Barrages.
8. Karray M. 2018 Ouvrage en terre - Chapitre 2. *Ouvrage En Terre*. See <http://gci735-mkb.espaceweb.usherbrooke.ca/>.
9. Bulota G, Larivière G. 1991 Le barrage Daniel-Johnson un vieillissement prématuré. pp. 187–210. Vienne: Commission Internationale Des Grands Barrages.
10. Saleh K, Tremblay S, Lizotte M, Larivière R, Roy V, Routhier L. 2003 Grouting of Daniel-Johnson Multiple Arch Dam. *HYDROSCIENCES*
11. Gallagher S, Léger P. 2014 Mechanical Resistance of Cracked Mass Concrete Repaired by Grouting: Experimental Study. *ACI Struct. J.* **111**, 799–807. (doi:10.14359/51686581)
12. Patton FD. 1966 Multiple Modes of Shear Failure In Rock. In *ISRM-ICONGRESS-1966-087*, ISRM: International Society for Rock Mechanics.
13. Barton N. 1973 Review of a new shear-strength criterion for rock joints. *Eng. Geol.* **7**, 287–332.
14. Ladanyi B, Archambault G. 1969 Simulation Of Shear Behavior Of A Jointed Rock Mass. In *ARMA-69-0105*, ARMA: American Rock Mechanics Association.
15. 2019 Province géologique du Québec. See <http://objectifnord.telequebec.tv/explorer/liste/sous-sol-du-nord/provinces-geologiques>.
16. Hydro-Québec. 2019 Centrales hydroélectriques. See <http://www.hydroquebec.com/production/centrale-hydroelectrique.html>.
17. SIGEOM. In press. Carte interactive de la géologie québécoise.

18. Landry B, Gauthier M, Lucotte M, Moingt M. 2012 *Notions de géologie*. 4th edn. Modulo.
19. Smith MR. 1999 *Building Stone, Rock Fill and Armorstone in Construction*. London: The Geological Society.
20. Cardarelli F. 2008 *Materials Handbook*. 2nd edn. Springer-Verlag.
21. Cossart É. 2008 Reconstitution de la géométrie 3D d'un glacier disparu et modélisation des conséquences de sa disparition - Le glacier durancien lors du Dernier Maximum Glaciaire. , 95–111.
22. Rivard P. 2017 *Mécanique des roches - Notes de cours*.
23. Nuth M. 2018 *Écoulement dans les sols - Notes de cours*.
24. Pedro JO, Mascarenhas A, Silva HS. 1995 Ageing of concrete dam foundations. *Eurock 93 Saf. Environ. Issues Rock Eng. Proc Symp. Lisb. 1993 Vol 2* , 1089–1094.
25. Fréchette V, Bigras A. 2014 Hydro-Québec Rapport de visite. , 1–29.
26. Potvin E. 2014 Hydro-Québec Rapport de caractérisation de l'eau d'infiltration. , 1–19.
27. Hoek E. 2007 *Practical rock engineering*. Rockscience. , 341
28. Martin F-A. 2010 *Stabilité des barrages : Influence de la température et étude de sensibilité sur la résistance au cisaillement des joints de coulée*. Université de Sherbrooke, Sherbrooke.
29. Bauret S. 2016 *Stabilité des Barrages-poids en béton : Contribution de la cohésion à la résistance de l'interface béton-rocher*. Mémoire, Université de Sherbrooke, Sherbrooke.
30. Salimian MH, Baghbanan A, Hashemolhosseini H, Dehghanipoodeh M, Norouzi S. 2017 Effect of grouting on shear behavior of rock joint. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* , 159–166.
31. Rulière A, Rivard P, Peyras L, Breul P. 2018 *Rock joints submitted to direct shear tests under low normal stress: evaluation of apparent cohesion values and key parameters*. Edmonton: GeoCanada.
32. Holtz RD, Kovacks WD. 1991 *Introduction à la géotechnique*. Montréal: Presses internationales Polytechnique.
33. Barton N. 2013 *Shear strength criteria for rock, rock joints, rockfill and rock masses: problems and some solutions*. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* , 249–261.
34. Bouchard S. 1991 In *Stabilité des ouvrages miniers*, p. 157–162. Québec.
35. Nouailletas O, Perlot C, Rivard P, Ballivy G, La Borderie C. 2017 *Impact of Acid Attack on the Shear Behavior of a Carbonate Rock joint*. *Springer.* , 1439-1451
36. Malki TE. 2006 *Développement d'un protocole expérimental pour l'estimation de la résistance au cisaillement d'un contact roc-béton*. Mémoire, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, CA.
37. Dight PM, Chiu HK. 1981 *Prediction of shear behavior of joints using profiles*. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* , 369–386.

38. Barton N, Choubey V. 1977 The shear strength of rock joint in theory and practice. *Rock Mech.* **10**, 1–54.
39. Barton N. 1976 The shear strength of rock and rock joints. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* , 255–279.
40. Johnston IW, Lam SK. 1989 Rock shear behavior of regular triangular rock-concrete joints-analysis. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* , 711–727.
41. Rousseau B. 2010 Comportement des interfaces fragiles des ouvrages hydroélectriques. Thèse Doctorat, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, CA.
42. Tse R, Cruden DM. 1979 Influence of Fracture Roughness on Aperture Fracture Surface and in Fluid Flow on Coarse-Grained Marble, Experimental Results. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* , 303–307.
43. Tetel'min VV, Ulyashinskii VA. 1992 Leaching of lime from grout curtains. *Plenum Publ. Corp.* , 21–24.
44. Romanov D, Gabrovšek F, Dreybrodt W. 2003 Dam sites in soluble rocks: A model of increasing leakage by dissolutional widening of fractures beneath a dam. *Eng. Geol.* **70**, 17–35.
45. Carde C, François R. 1999 Modelling the loss of strength and porosity increase due to the leaching of cement pastes. *Cem. Concr. Compos.* , 181–188.
46. Brianzoni V, Fratolocchi E, Pasqualini E. 2013 Long term performance of cement-bentonite cut-offs in saline and acidic solutions. In *Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 3001-3004
47. Laver RG, Soga K, Wright P, Jefferis S. 2013 Permeability of aged grout around tunnels in London. *Géotechnique* **63**, 651–660.
48. Bruce DA. 1992 Progress and Developments in Dam Rehabilitation bu Grouting. , 1-15
49. Ballivy G, Benmokrane B, Colin J-C, Aitcin P-C. 1990 Étude sur éprouvettes de la perméabilité de roches injectées d'un coulis de ciment.
50. Kari OP, Puttonen J. 2014 Simulation of concrete deterioration in Finnish rock cavern conditions for final disposal of nuclear waste. *Ann. Nucl. Energy* **72**, 20–30.
51. Gale JE, Reardon EJ. 1984 Effects of groundwater geochemistry on the permeability of grouted fractures. *Can. Geotech. J.* , 8–20.
52. Yue F-T, Zhang S-B, Li W-Y, Huang H-B. 2008 Study on thaw settlement grouting applied to connected aisle construction with artificial ground freezing method in metro tunnel. *Yantu LixueRock Soil Mech.* **29**, 2283–2286.
53. Tran T-H, Vénier R, Cambou B. 2009 Discrete modelling of rock-ageing in rockfill dams. *Comput. Geotech.* **36**, 264–275.
54. Hu J. 2016 Multi-scale numerical simulation analysis for influence of combined leaching and frost deteriorations on mechanical properties of concrete. *Multidiscip. Model. Mater. Struct.* **12**, 648–671.

55. Chang R. 2005 *Physical Chemistry for the Biosciences*. pp. 311–347. Sausalito (CA).
56. Kittel C. 1998 *Solid state physics*. Science sup
57. Environnement Canada. 1979 Le bassin versant de la rivière Manicouagan.
58. ASTM (American Society for Testing and Materials). 2015 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens - C39-15a.
59. Li Y, Zhang Y. 2015 Quantitative estimation of joint roughness coefficient using statistical parameters. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* , 1-8
60. ASTM. 2008 Standard Test Method for Performing Laboratory Direct Shear Strength Tests of Rock Specimens Under Constant Normal Force - D5607-08.
61. Pereira JP. 1997 Rolling friction and shear behaviour of rock discontinuities filled with sand. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* , 34:3-4

ANNEXE A – Plan de conception

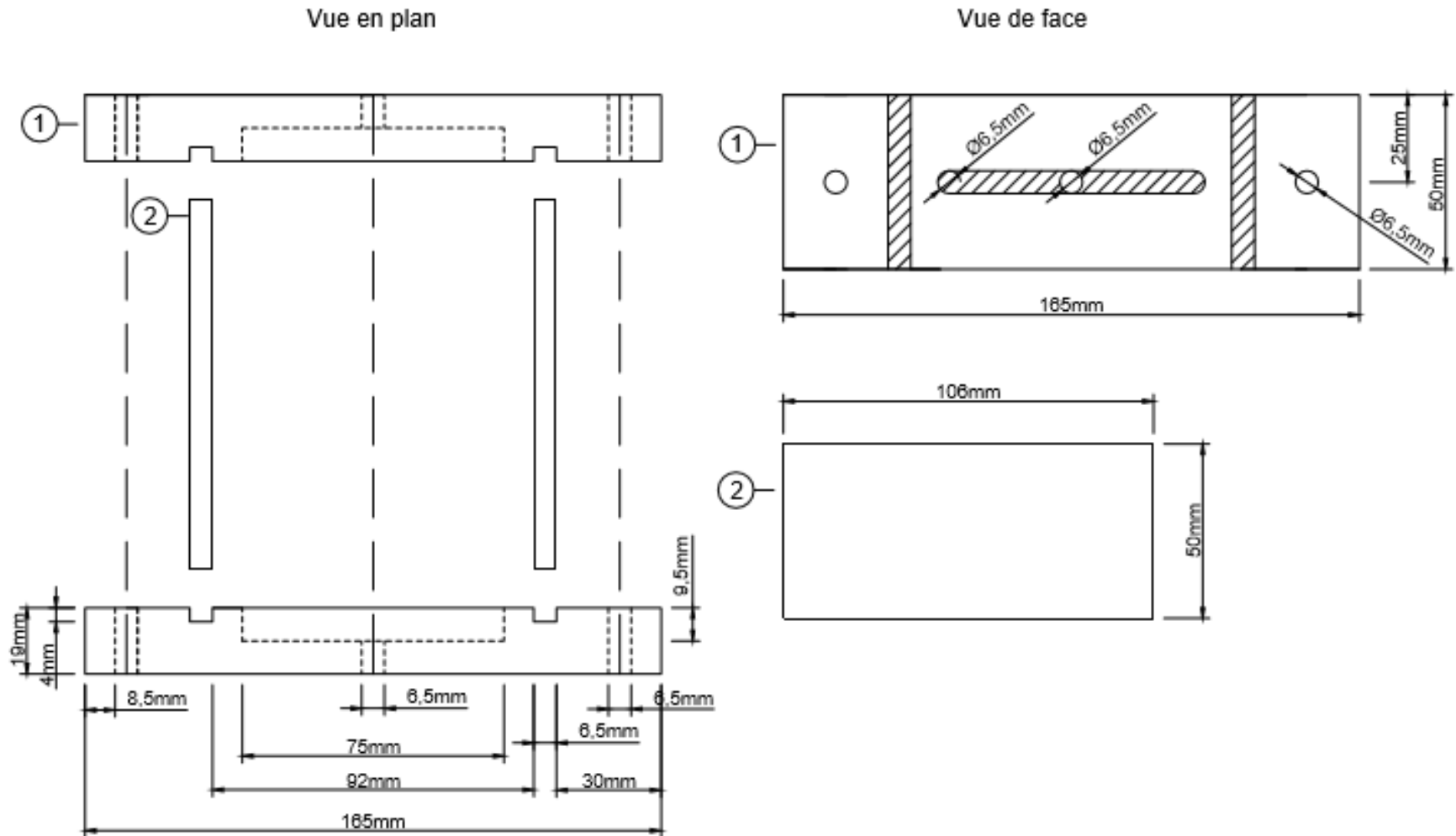


Figure A.1 – Dimensions du boîtier de dégradation

ANNEXE B – Tableaux des données

B.1 – Suivi des montages de dégradation

Tableau B.1 – Suivi des montages d'écoulement série 1

Type : Reproductibilité
Écoulement: Acide

Temps	Température	pH	pH stabilisé
0	23	5.05	-
1	23	5.50	4.95
2	23	5.40	4.95
3	23	5.25	4.97
4	23	5.08	4.91
5	23	5.05	4.93
6	23	4.97	-
7	23	5.02	-
8	23	5.07	4.93
9	23	5.01	-
10	23	5.07	4.95
11	23	5.03	4.88
12	23	4.96	-
13	23	4.98	-
14	23	5.00	-
15	23	5.01	-
16	23	5.02	-
17	23	5.03	-
18	23	5.04	-
19	23	5.05	-
20	23	5.06	4.93
21	23	4.94	-
22	23	4.95	-
23	23	4.95	-
24	23	4.96	-
25	23	4.96	-
26	23	4.97	-
27	23	4.97	-
28	23	4.98	-

Tableau B.2 – Suivi des montages d'écoulement série 2

Série : 2
 Matériaux : Sika
 Type : Détérioration
 Écoulement : Acide

Temps	Température	pH	pH stabilisé	Changement solution	Temps	Température	pH	pH stabilisé	Changement solution
0	34	5.00	-	-	29	31	4.67	-	-
1	32	6.04	4.94	-	30	31	5.23	4.79	-
2	31	5.67	4.93	-	31	-	-	-	-
3	31	5.63	5.03	-	32	-	-	-	-
4	31	5.56	5.01	-	33	31	5.53	4.93	-
5	31	5.37	5.01	-	34	31	4.99	-	-
6	31	5.34	4.91	-	35	31	5.15	5.02	-
7	31	5.22	4.84	-	36	31	5.05	-	-
8	31	4.95	-	-	37	31	5.13	4.82	-
9	30.5	5.07	4.92	-	38	-	-	-	-
10	30.5	4.96	-	-	39	-	-	-	-
11	-	-	-	-	40	31	5.19	4.65	-
12	-	-	-	-	41	31	4.95	-	-
13	31	5.21	5.01	-	42	31	4.99	-	-
14	31	5.08	4.86	Oui	43	-	-	-	-
15	31	5.57	4.80	-	44	-	-	-	-
16	31	5.85	4.96	-	45	31	5.71	4.88	-
17	34	5.83	4.96	-	46	31	5.1	-	-
18	-	-	-	-	47	31	4.92	-	-
19	-	-	-	-	48	31	5.07	-	-
20	33	7.77	5.10	-	49	31	5.19	4.82	-
21	33	6.05	4.78	-	50	-	-	-	-
22	31	5.46	4.85	-	51	-	-	-	-
23	31	5.43	4.95	-	52	-	-	-	-
24	31	5.37	4.94	-	53	31	5.29	4.93	-
25	31	5.38	4.84	-	54	31	5.1	-	-
26	31	5.32	4.71	-	55	31	5.25	4.83	-
27	31	5.27	4.94	-	56	31	4.95	-	-
28	-	-	-	Oui	-	-	-	-	-

Tableau B.3 – Suivi des montages d'écoulement série 3

Série : 3
 Matériaux : Sika
 Type : Détérioration
 Écoulement : Eau

Temps	Température	pH	pH stabilisé	Changement solution	Temps	Température	pH	pH stabilisé	Changement solution
0					29	35	7.82	-	-
1	36	7.50	-	-	30	36	7.71	-	-
2	35	7.55	7.21	Oui (Over 8)	31	-	-	-	-
3	33	7.34	7.24	Oui (Over 8)	32	-	-	-	-
4	35	7.30	7.11	Oui (Over 8)	33	36	8.12	7.42	Oui (Over 8)
5	34	7.25	7.09	Oui (Over 8)	34	36	7.44	-	-
6	34	7.05	7.14	Oui (Over 8)	35	36	7.48	-	-
7	34	7.30	7.00	Oui (Over 8)	36	36	7.5	-	-
8	34	7.65	-	-	37	36	7.52	-	-
9	35	8.02	7.12	Oui (Over 8)	38	-	-	-	-
10	35	7.80	7.04	Oui (Over 8)	39	-	-	-	-
11	-	-	-	-	40	36	7.64	-	-
12	-	-	-	-	41	36	7.68	-	-
13	35	7.99	7.27	Oui (Over 8)	42	36	7.75	-	-
14	35	7.97	7.39	Oui (Over 8)	43	-	-	-	-
15	35	7.74	-	-	44	-	-	-	-
16	35	7.84	-	-	45	36	7.87	-	-
17	35.5	7.91	7.23	Oui (Over 8)	46	36	7.69	-	-
18	-	-	-	-	47	36	7.73	-	-
19	-	-	-	-	48	36	7.82	-	-
20	37	7.90	-	-	49	36	7.9	-	-
21	36	7.99	7.46	Oui (Over 8)	50	-	-	-	-
22	36	7.96	7.44	Oui (Over 8)	51	-	-	-	-
23	35	8.10	7.54	Oui (Over 8)	52	-	-	-	-
24	35	7.75	7.52	Oui (Over 8)	53	36	8.1	7.35	Oui (Over 8)
25	-	-	-	-	54	36	7.7	-	-
26	-	-	-	-	55	36	7.75	-	-
27	35	8.15	7.63	-	56	36	7.78	-	-
28	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tableau B.4 – Suivi des montages d'écoulement série 4

Série : 4
 Matériaux : Roc
 Type : Détérioration
 Écoulement : Acide

Temps	Température	pH	pH stabilisé	Changement solution	Temps	Température	pH	pH stabilisé	Changement solution
0					29	-	-	-	-
1	31	5.51	4.75	-	30	-	-	-	-
2	33	5.5	5.01	-	31	33	7.19	5.10	-
3	33	5.35	4.86	-	32	33	5.77	4.41	-
4	33	5.11	4.88	-	33	33	4.93	-	-
5	33	5.17	4.65	-	34	-	-	-	-
6	-	-	-	-	35	33	5.71	4.73	-
7	-	-	-	-	36	-	-	-	-
8	33	5.24	5	-	37	-	-	-	-
9	33	5.25	4.81	-	38	-	-	-	-
10	33	5	-	-	39	33	6.04	4.83	-
11	33	5.15	4.92	-	40	33	4.91	-	-
12	33	5.18	3.81	Oui	41	33	5.03	-	-
13	33	5	-	-	42	33	6.02	3.68	-
14	31	5.70	5.11	-	43	-	-	-	-
15	-	-	-	-	44	-	-	-	-
16	-	-	-	-	45	33	5.08	-	-
17	-	-	-	-	46	33	5.33	4.97	-
18	33	5.77	4.94	-	47	33	5.17	4.99	-
19	33	5.27	4.85	-	48	33	5.18	5.03	-
20	33	5.18	4.95	-	49	33	5.21	4.82	-
21	33	5.08	4.91	-	50	-	-	-	-
22	33	5.15	4.73	-	51	-	-	-	-
23	-	-	-	-	52	33	5.37	5.00	-
24	-	-	-	-	53	33	5.14	5.03	-
25	33	4.92	-	-	54	33	5.05	-	-
26	33	5.23	-	-	55	33	5.09	-	-
27	33	5.46	3.77	Oui	56	33	5.57	-	-
28	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tableau B.5 – Suivi des montages d'écoulement série 5

Série : 5

Matériaux : Roc

Type : Détérioration

Écoulement : Eau

Temps	Température	pH	pH stabilisé	Changement solution	Temps	Température	pH	pH stabilisé	Changement solution
0	17	8.4	-	-	29	-	-	-	-
1	33	9.89	7.75	Oui (Over 8)	30	-	-	-	-
2	36	8.31	7.5	Oui (Over 8)	31	36	7.95	-	-
3	36	7.98	-	-	32	36	7.97	-	-
4	36	7.99	-	-	33	36	7.99	-	-
5	36	7.95	-	-	34	-	-	-	-
6	-	-	-	-	35	36	8.11	7.25	-
7	-	-	-	-	36	-	-	-	-
8	36	8.38	7.6	Oui (Over 8)	37	-	-	-	-
9	36	7.98	-	-	38	-	-	-	-
10	36	8	-	-	39	36	7.93	-	-
11	36	7.97	-	-	40	36	7.95	-	-
12	36	8.23	8.5	-	41	36	7.97	-	-
13	36	7.95	-	-	42	36	8.01	7.12	-
14	36	8.28	7.4	-	43	-	-	-	-
15	-	-	-	-	44	-	-	-	-
16	-	-	-	-	45	36	7.86	-	-
17	-	-	-	-	46	36	7.93	-	-
18	36	7.93	-	-	47	36	7.97	-	-
19	36	7.95	-	-	48	36	7.99	-	-
20	36	7.97	-	-	49	36	7.98	7.40	-
21	36	7.99	-	-	50	-	-	-	-
22	36	8.02	7.25	-	51	-	-	-	-
23	-	-	-	-	52	36	7.82	-	-
24	-	-	-	-	53	36	7.83	-	-
25	36	7.95	-	-	54	36	7.93	-	-
26	36	7.97	-	-	55	36	7.95	-	-
27	36	7.85	-	-	56	36	7.98	-	-
28	-	-	-	-	29	-	-	-	-

B.2 – Variation de la masse

Tableau B.6 – Variation de masse durant la dégradation pour les séries 1 et 2

Série : 1

Matériaux : Sika

Écoulement : Acide

Temps	Matériau	Masse initiale (g)	Masse après détérioration (g)	Masse après brossage (g)	Perte de masse (g)
28	Coulis	844.9	839.2	833.1	-11.8
28	Sika	617.5	615.0	612.9	-4.6
28	Coulis	872.6	866.1	860.0	-12.6
28	Sika	638.4	637.9	634.6	-3.8
28	Coulis	870.0	862.5	856.6	-13.4
28	Sika	645.8	645.2	642.6	-3.2

Série : 2

Matériaux : Sika

Écoulement : Acide

Temps	Matériau	Masse initiale (g)	Masse après détérioration (g)	Masse après brossage (g)	Perte de masse (g)
14	Coulis	809.5	769.4	-	-40.1
14	Sika	591.1	581.1	-	-10.0
28	Coulis	798.8	767.4	-	-31.4
28	Sika	551.8	543.9	-	-7.9
42	Coulis	751.8	726.5	-	-25.3
42	Sika	573.1	566.8	-	-6.3
56	Coulis	826.6	802.2	-	-24.4
56	Sika	542.0	535.9	-	-6.1
56	Coulis	790.6	765.9	-	-24.7
56	Sika	532.2	526.0	-	-6.2
56	Coulis	819.3	797.5	-	-21.8
56	Sika	576.8	571.3	-	-5.5

Tableau B.7 – Variation de masse durant la dégradation pour les séries 3 et 4

Série : 3
 Matériaux : Sika
 Type : Détérioration
 Écoulement : Eau

Temps	Matériau	Masse initiale (g)	Masse après détérioration (g)	Masse après brossage (g)	Perte de masse (g)
14	Coulis	744.0	731.9	-	-12.1
14	Sika	617.6	614.6	-	-3.0
28	Coulis	714.0	702.0	-	-12.0
28	Sika	621.1	618.1	-	-3.0
42	Coulis	724.4	711.6	-	-12.8
42	Sika	589.2	586.0	-	-3.2
56	Coulis	734.8	723.8	-	-11.0
56	Sika	596.6	593.9	-	-2.7
56	Coulis	735.1	723.7	-	-11.4
56	Sika	546.7	543.9	-	-2.8
56	Coulis	706.4	698.0	-	-8.4
56	Sika	574.0	571.9	-	-2.1

Série : 4
 Matériaux : Roc
 Type : Détérioration
 Écoulement : Acide

Temps	Matériau	Masse initiale (g)	Masse après détérioration (g)	Masse après brossage (g)	Perte de masse (g)
14	Coulis	450.6	433.6	-	-17
14	Roc	688.5	690.5	-	2
28	Coulis	445.3	430.6	-	-14.7
28	Roc	871.5	873.9	-	2.4
42	Coulis	323.1	313	-	-10.1
42	Roc	1020.6	1022.6	-	2
56	Coulis	416.2	397.3	-	-18.9
56	Roc	931.7	935.5	-	3.8
56	Coulis	394.2	372.3	-	-21.9
56	Roc	655.2	659.2	-	4
56	Coulis	377.5	360.4	-	-17.1
56	Roc	936.3	941.5	-	5.2

Tableau B.8 – Variation de masse durant la dégradation pour la série 5

Série : 5

Matériaux : Roc

Type : Détérioration

Écoulement : Eau

Temps	Matériau	Masse initiale (g)	Masse après détérioration (g)	Masse après brossage (g)	Perte de masse (g)
14	Coulis	505.3	504.7	-	-0.6
14	Roc	928.2	929.5	-	1.3
28	Coulis	475.9	479.9	-	4
28	Roc	783	785.9	-	2.9
42	Coulis	500.2	501.2	-	1
42	Roc	639.8	642.3	-	2.5
56	Coulis	397.6	406	-	8.4
56	Roc	985.6	987.5	-	1.9
56	Coulis	475.8	486.3	-	10.5
56	Roc	728.2	729.6	-	1.4
56	Coulis	417.6	423.2	-	5.6
56	Roc	1099.6	1100.3	-	0.7

B.3 – Résistance à la compression

Tableau B.9 – Résistance à la compression des matériaux cimentaires de la série 1

Série : 1
Partie : Bottom
Matériau: Sika

Âge	Dimension (mm)	Dimension (mm)	Résistance (Mpa)
7	50	51	49.9
7	50	50	51.8
7	51	52	44.3
Moy			<u>48.6</u>
28	51	51	54.7
28	50	50	55.2
28	51	51	58.1
Moy			<u>56</u>

Série : 1
Partie : Top
Matériau: Sika

Âge	Dimension (mm)	Dimension (mm)	Résistance (Mpa)
7	50	50	57.1
7	50	50	58.0
7	51	51	52.3
Moy			<u>55.8</u>
28	51	51	67.5
28	50	50	69.4
28	49	51	65.0
Moy			<u>67</u>

Série : 1
Partie : Milieu
Matériau: Coulis

Âge	Dimension (mm)	Dimension (mm)	Résistance (Mpa)
7	49	51	40.0
7	47	49.5	34.4
7	49	50	36.3
Moy			<u>36.9</u>
28	49	50.5	51.8
28	50	50	47.3
28	48.5	50.5	51.4

Tableau B.10 – Résistance à la compression des matériaux cimentaires de la série 2

Série : 2
Partie : Bottom
Matériau: Sika

Âge	Dimension (mm)	Dimension (mm)	Résistance (Mpa)
7	51	50.5	48.2
7	51	51	48.6
7	50.5	50.5	49.2
Moy			<u>48.6</u>
28	51	50.25	59.0
28	50	50	59.4
28	51	51	55.2
Moy			<u>57.9</u>

Série : 2
Partie : Top
Matériau: Sika

Âge	Dimension (mm)	Dimension (mm)	Résistance (Mpa)
7	50.25	50.25	44.6
7	50	50.5	44.9
7	50.25	50	45.3
Moy			<u>44.9</u>
28	51	51.75	58.0
28	51	51.75	55.4
28	51	53	54.6
Moy			<u>56.0</u>

Série : 2
Partie : Milieu
Matériau: Coulis

Âge	Dimension (mm)	Dimension (mm)	Résistance (Mpa)
7	51	48	35.4
7	51	49	34.7
7	51	50	34.9
Moy			<u>35.0</u>
28	51	46	35.4
28	51	49	34.7
28	51	47	34.9
Moy			<u>35.0</u>

Tableau B.11 – Résistance à la compression des matériaux cimentaires de la série 3

Série : 3
Partie : Bottom
Matériau: Sika

Âge	Dimension (mm)	Dimension (mm)	Résistance (Mpa)
7	51	50	40.99
7	51	52	50.32
7	51	47	55.30
Moy			<u>49</u>
28	51	51.5	60.12
28	50.5	51.5	66.70
28	51.75	51.5	65.09
Moy			<u>64</u>

sec
sec
sec

Série : 3
Partie : Top
Matériau: Sika

Âge	Dimension (mm)	Dimension (mm)	Résistance (Mpa)
7	51	51	47.88
7	50	51	49.89
7	50	50.75	51.54
Moy			<u>50</u>
28	50	51.25	57.28
28	51.25	51.25	62.32
28	51	49.25	61.27
Moy			<u>60</u>

Série : 3
Partie : Milieu
Matériau: Coulis

Âge	Dimension (mm)	Dimension (mm)	Résistance (Mpa)
7	51.5	50	34.55
7	50.5	49	37.57
7	50.5	51	36.10
Moy			<u>36</u>
28	51.75	51.75	41.36
28	51.75	50.25	46.18
28	51.25	51	44.25
Moy			<u>44</u>

Tableau B.12 – Résistance à la compression des matériaux cimentaires de la série 4 et 5

Série : 4
Partie : Bottom
Matériau: Coulis

Âge	Dimension (mm)	Dimension (mm)	Résistance (Mpa)
7	47.5	51.5	33.6
7	47.8	51.8	38.6
7	48.1	51.7	39.4
Moy			<u>37.2</u>
28	51.5	48.5	35.6
28	52	50.5	52.5
28	47.5	51.5	43.6
Moy			<u>44</u>

Série : 5
Partie : Bottom
Matériau: Coulis

Âge	Dimension (mm)	Dimension (mm)	Résistance (Mpa)
7	49.1	51.9	34.9
7	51.3	49.8	36.6
7	51.5	48.5	35.3
Moy			<u>35.6</u>
28	51.75	49.25	36.6
28	51.25	49.25	45.8
28	51.25	48.75	49.8
Moy			<u>44</u>

B.4 – ICP des échantillons aqueux

Tableau B.13 – ICP de la solution acide pour la série 2

		Nombre de jours de la solution				
		Élément	0	1	7	14
0-14	K		1000	1020	1040	1010
	Ca		31.4	628	998	1010
	Si		-25.8	38	42.4	45.5
	Mg		2.69	26.6	35.2	34.7
	Al		-1.02	19	10.7	10.6
	Na		3330	3260	3480	3360
15-28	K		1160	1060	908	1380
	Ca		49.3	380	484	814
	Si		-37.4	-1.55	5	41.9
	Mg		2.31	15.4	13.3	22.3
	Al		-1.13	13	13.7	24
	Na		3240	3010	2720	3760
29-42	K		1490	465	-	1.33
	Ca		892	272	-	42.6
	Si		55.3	-24.8	-	-21.7
	Mg		24	6.54	-	2.42
	Al		24.9	5.63	-	-1.13
	Na		4050	1220	-	4040
43-56	K		26.3	44.4	-	50.6
	Ca		330	594	-	677
	Si		15.4	44	-	49.7
	Mg		11.7	18.5	-	20.3
	Al		16.7	30.1	-	34.3
	Na		4410	5550	-	5960

Tableau B.14 – ICP de la solution acide pour la série 4

		Nombre de jours de la solution				
		Élément	0	1	7	14
0-14	K		0.182	6.58	84	133
	Ca		169	93.9	1320	1850
	Si		-38.4	-16	29.3	57.5
	Mg		4.97	2.92	24	33.8
	Al		1.37	2.22	23	33.1
	Na		3550	3590	4090	5660
15-28	K		7.1	19	42.6	82.5
	Ca		-2.87	447	797	1350
	Si		-39.1	4.33	34.7	42.1
	Mg		3.75	15.9	24.2	37.2
	Al		0.559	23.6	35.4	55.2
	Na		3760	3450	4710	7030
29-42	K		-0.84	3.86	6.79	26
	Ca		-7.82	306	404	820
	Si		-44	6.41	21	38.6
	Mg		3.42	14.1	16	28.6
	Al		0.39	21	24.1	45.3
	Na		3640	4290	4630	7920
43-56	K		-1.1	5.12	12	21.1
	Ca		-3.18	246	320	438
	Si		-45.6	5.89	13.1	25.4
	Mg		3.13	9.15	9.68	11.4
	Al		0.251	12.1	13.6	16.5
	Na		3500	3630	3670	4330

ANNEXE C – Figures de résultats

C.1 Résultats des directs cisaillement des éprouvettes mortier-coulis

C.1.1 Échantillons non dégradés

Témoin 1

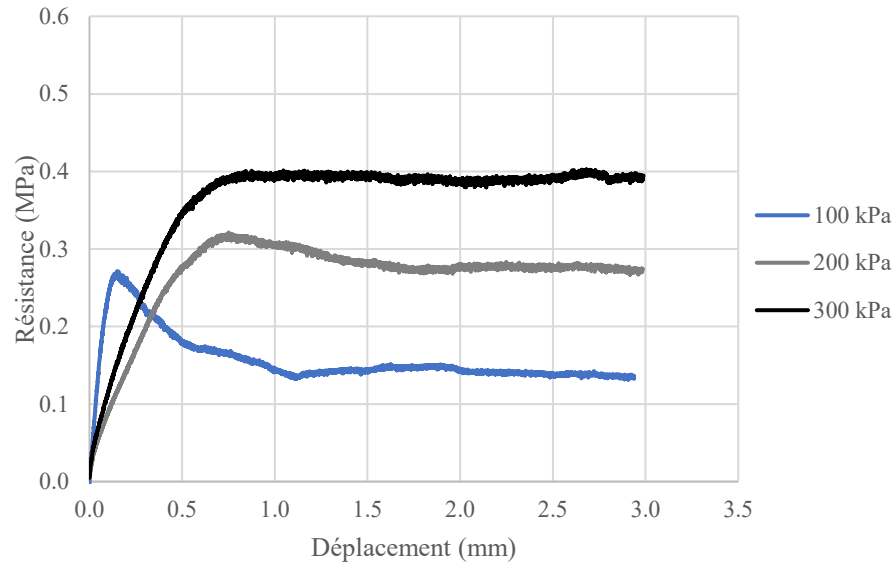


Figure C.1 – Résistance au cisaillement d'un échantillon mortier-coulis non dégradé

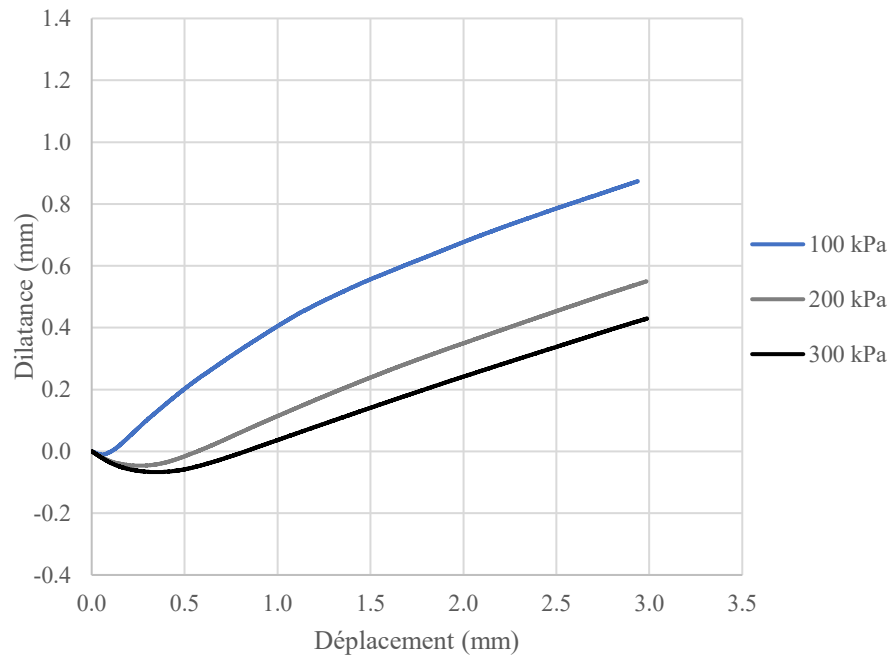


Figure C.2 – Dilatance d'un échantillon mortier-coulis non dégradé

Témoïn 2

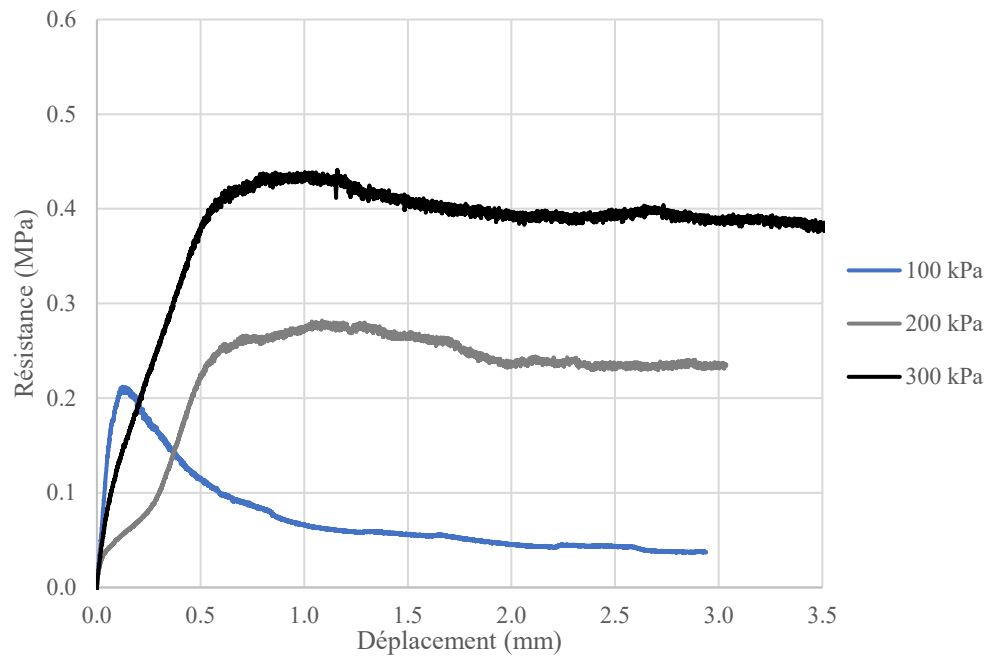


Figure C.3 – Résistance au cisaillement d'un échantillon mortier-coulis non dégradé

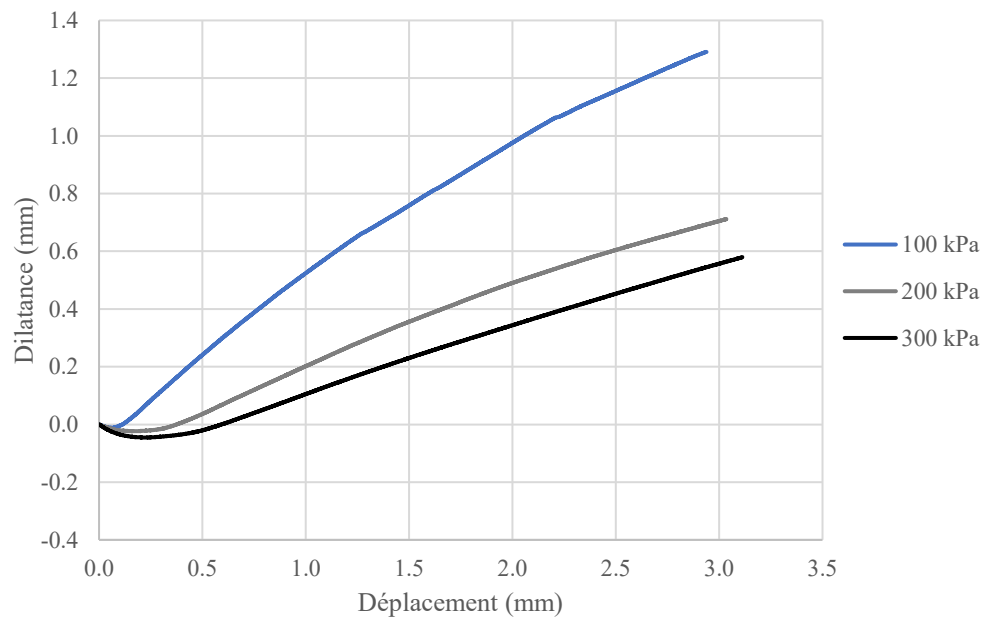


Figure C.4 – Dilatance d'un échantillon mortier-coulis non dégradé

Témoïn 3

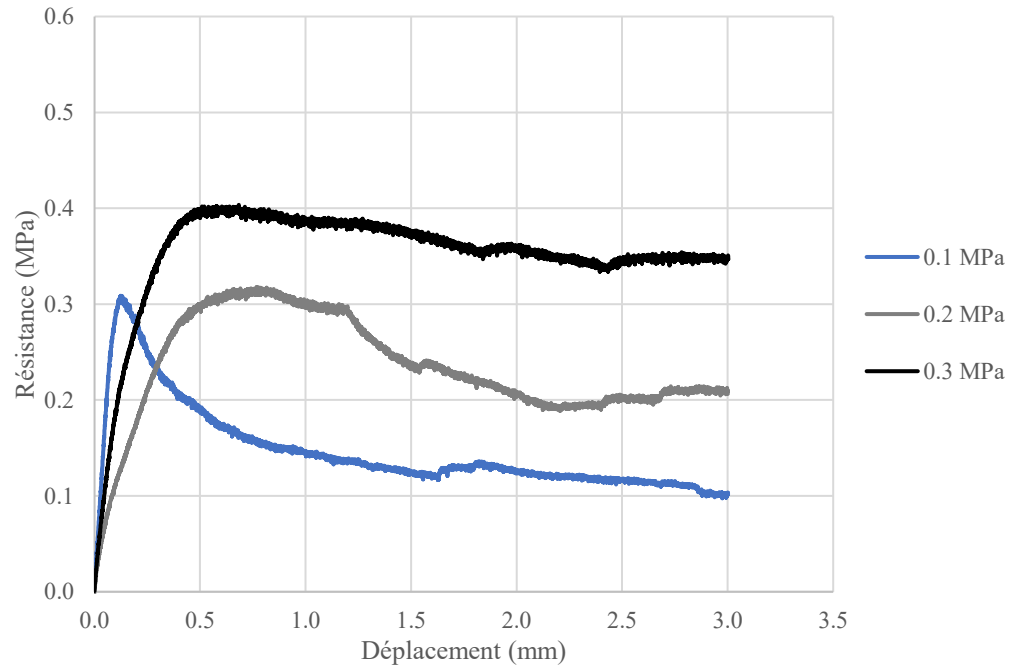


Figure C.5 – Résistance au cisaillement d'un échantillon mortier-coulis non dégradé

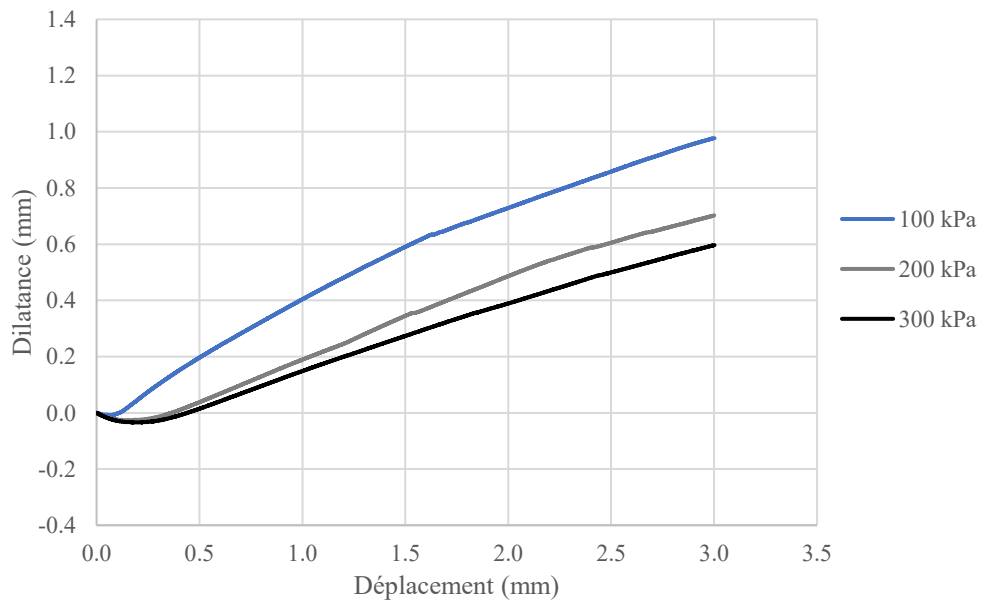


Figure C.6 – Dilatance d'un échantillon mortier-coulis non dégradé

C.1.2 Échantillons dégradés à l'eau

Dégradé 14 jours

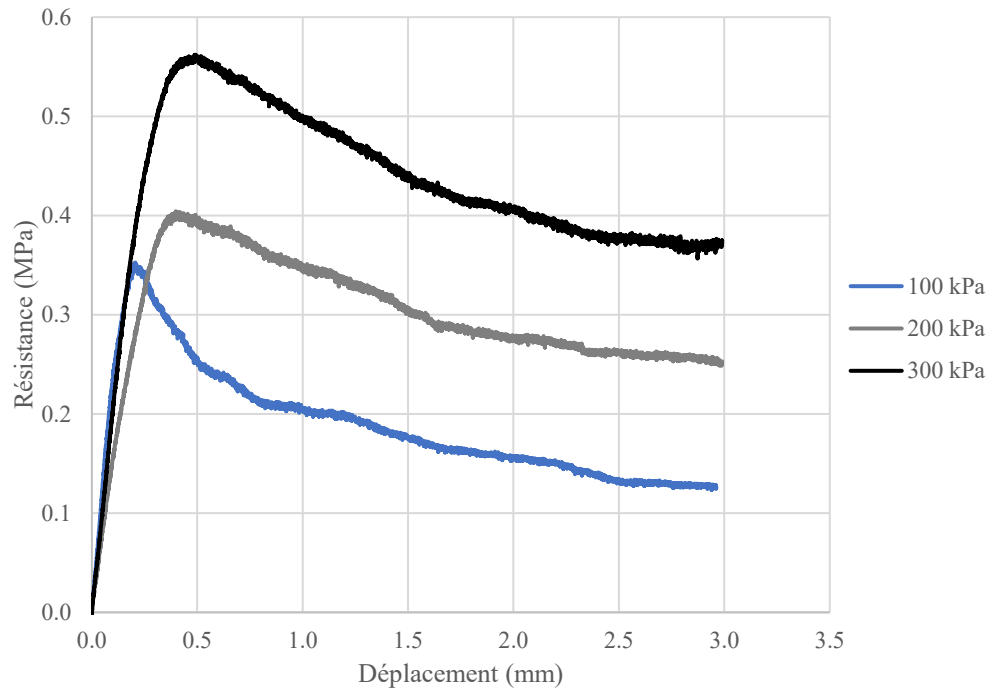


Figure C.7 – Résistance au cisaillement d'un échantillon mortier-coulis dégradé durant 14 jours avec de l'eau

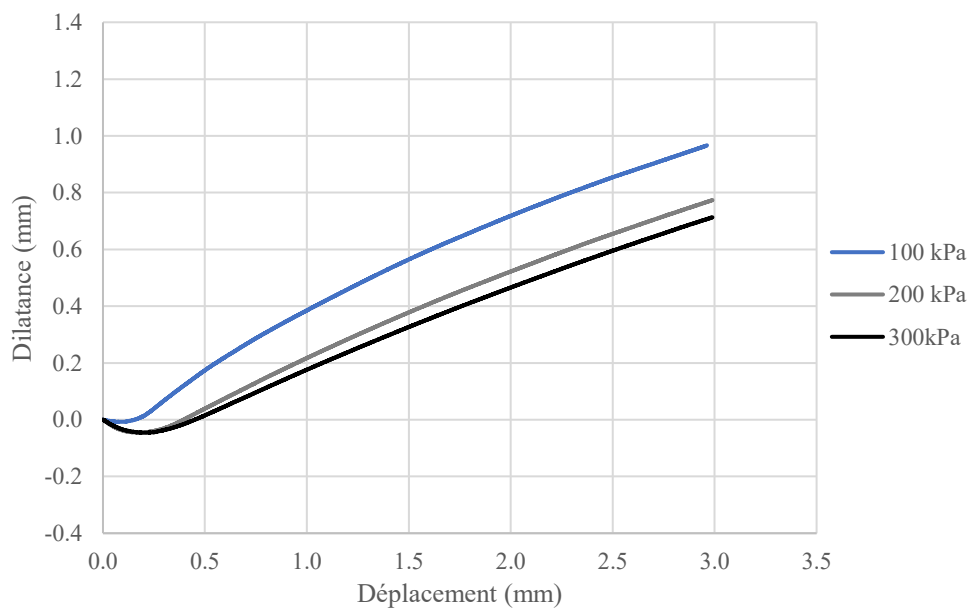


Figure C.8 – Dilatance d'un échantillon mortier-coulis dégradé durant 14 jours avec de l'eau

Dégradé 28 jours

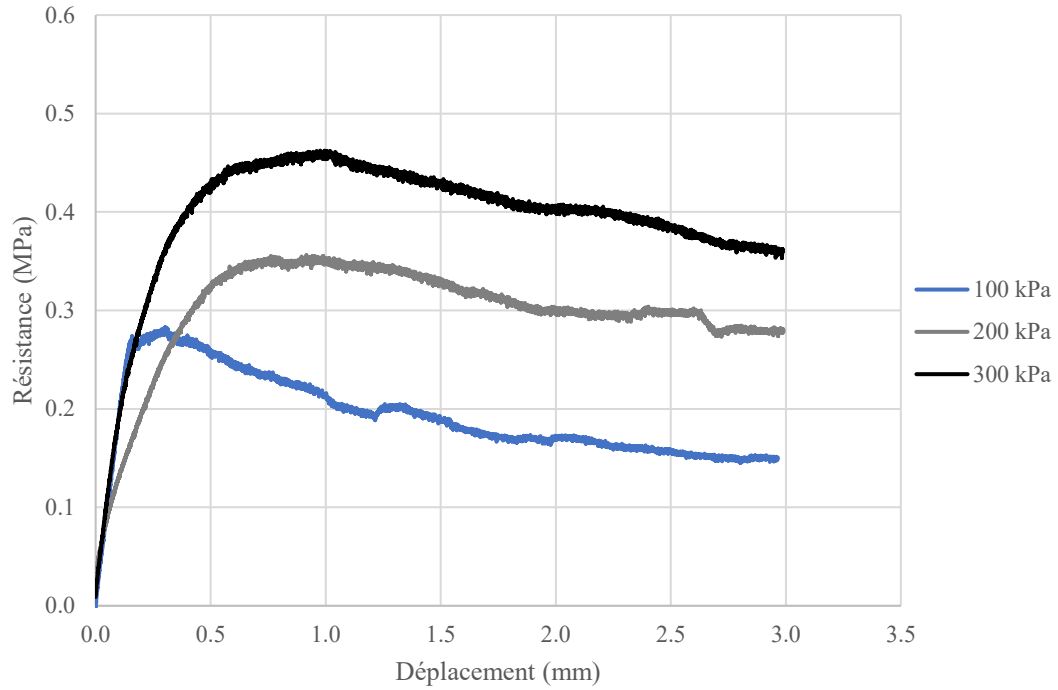


Figure C.9 – Résistance au cisaillement d'un échantillon mortier-coulis dégradé durant 28 jours avec de l'eau

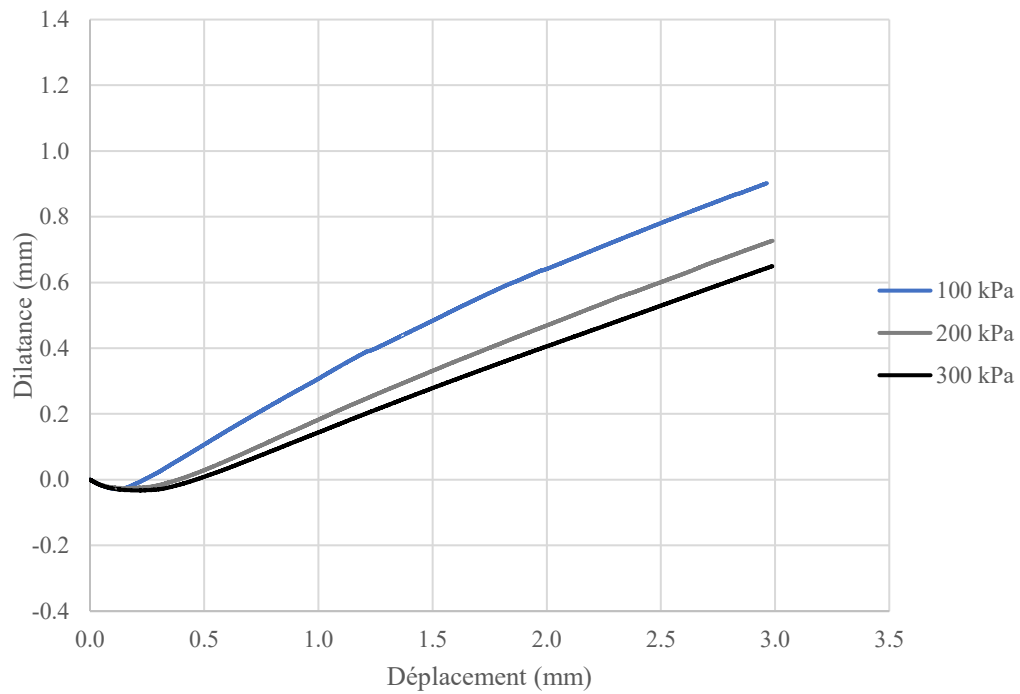


Figure C.10 – Dilatance d'un échantillon mortier-coulis dégradé durant 28 jours avec de l'eau

Dégradé 42 jours

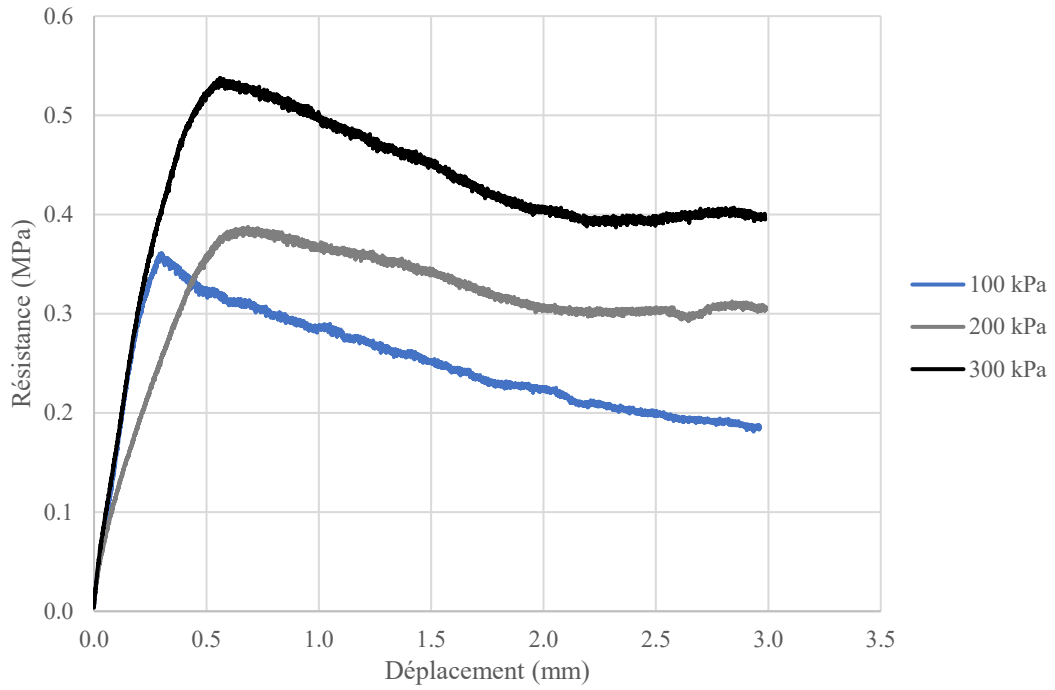


Figure C.11 – Résistance au cisaillement d'un échantillon mortier-coulis dégradé durant 42 jours avec de l'eau

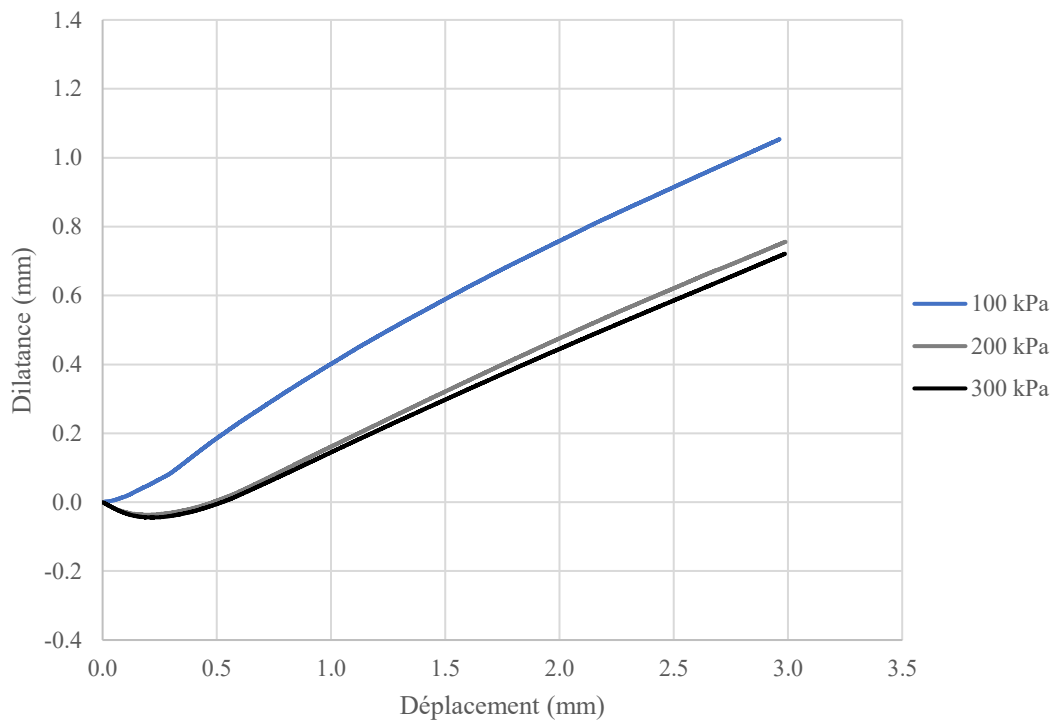


Figure C.12 – Dilatance d'un échantillon mortier-coulis dégradé durant 42 jours avec de l'eau

Dégradé 56 jours – Échantillon 1

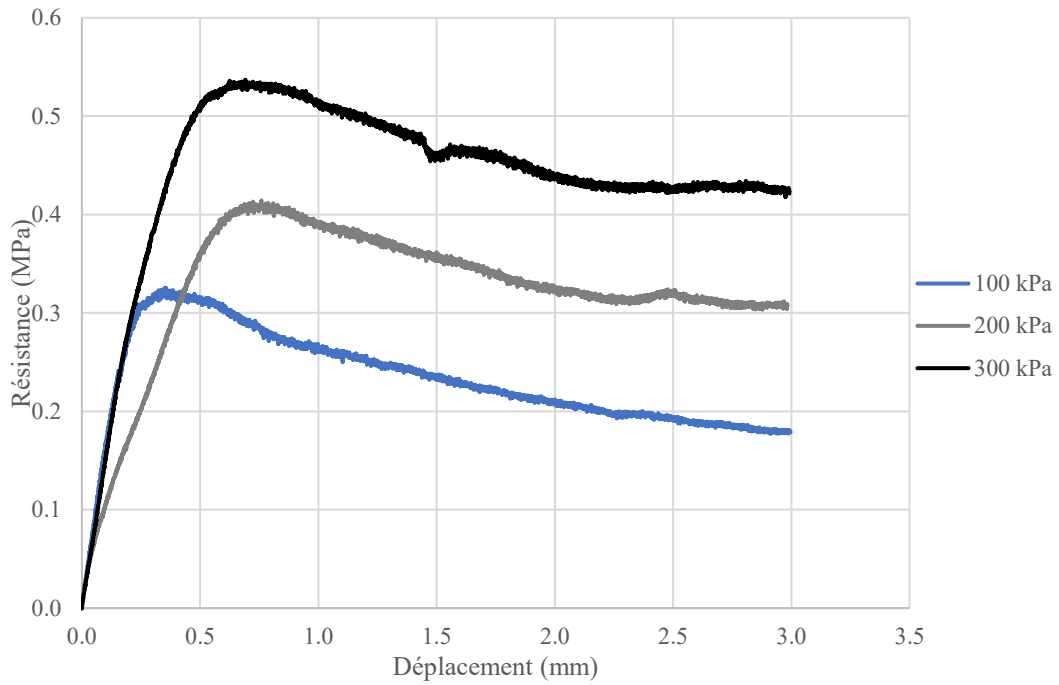


Figure C.13 – Résistance au cisaillement d'un échantillon mortier-coulis dégradé durant 56 jours avec de l'eau

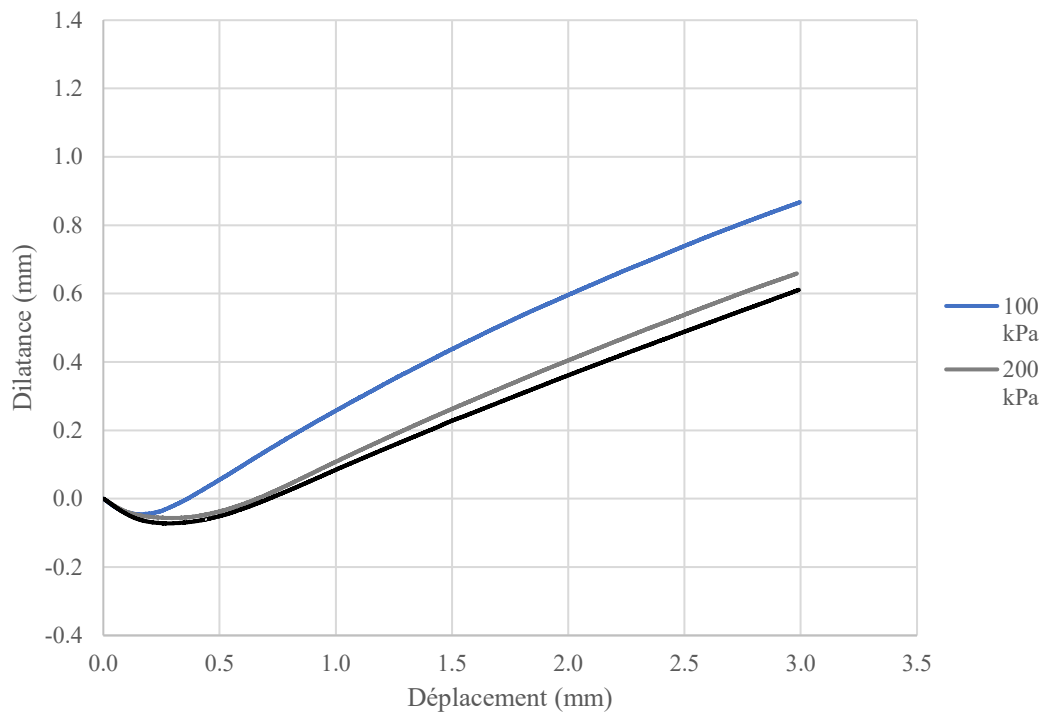


Figure C.14 – Dilatance d'un échantillon dégradé mortier-coulis durant 56 jours avec de l'eau

Dégradé 56 jours – Échantillon 2

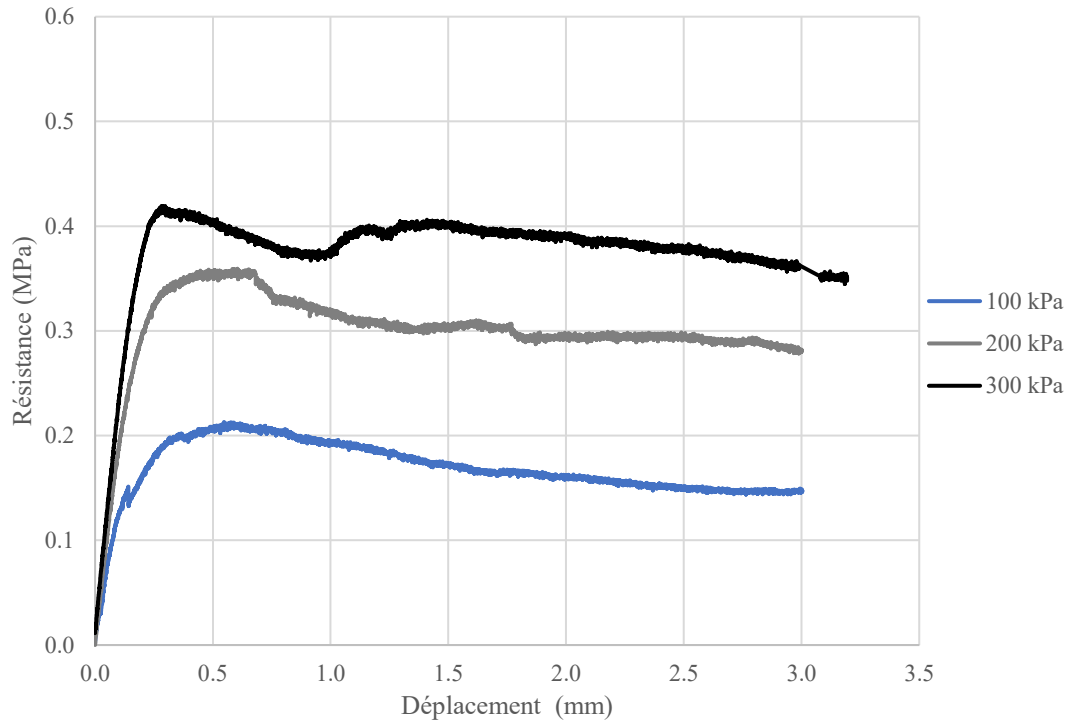


Figure C.15 – Résistance au cisaillement d'un échantillon mortier-coulis dégradé durant 56 jours avec de l'eau

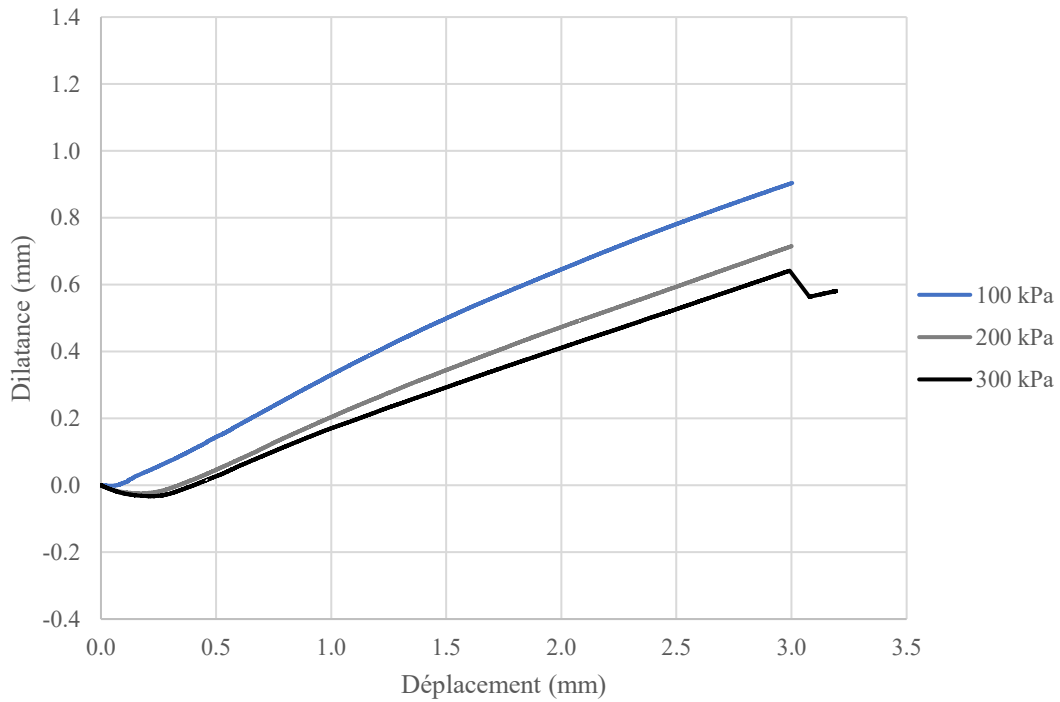


Figure C.16 – Dilatance d'un échantillon mortier-coulis dégradé durant 56 jours avec de l'eau

C.1.3 Échantillons dégradés à l'acide

Dégradé 14 jours

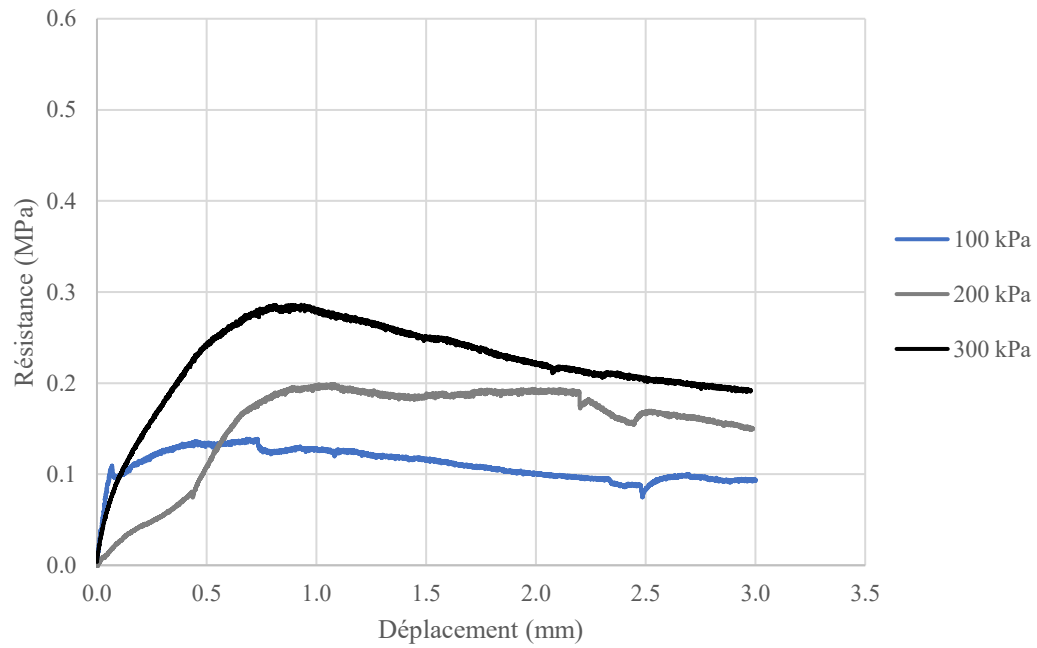


Figure C.17 – Résistance au cisaillement mortier-coulis dégradé durant 14 jours avec de l'acide

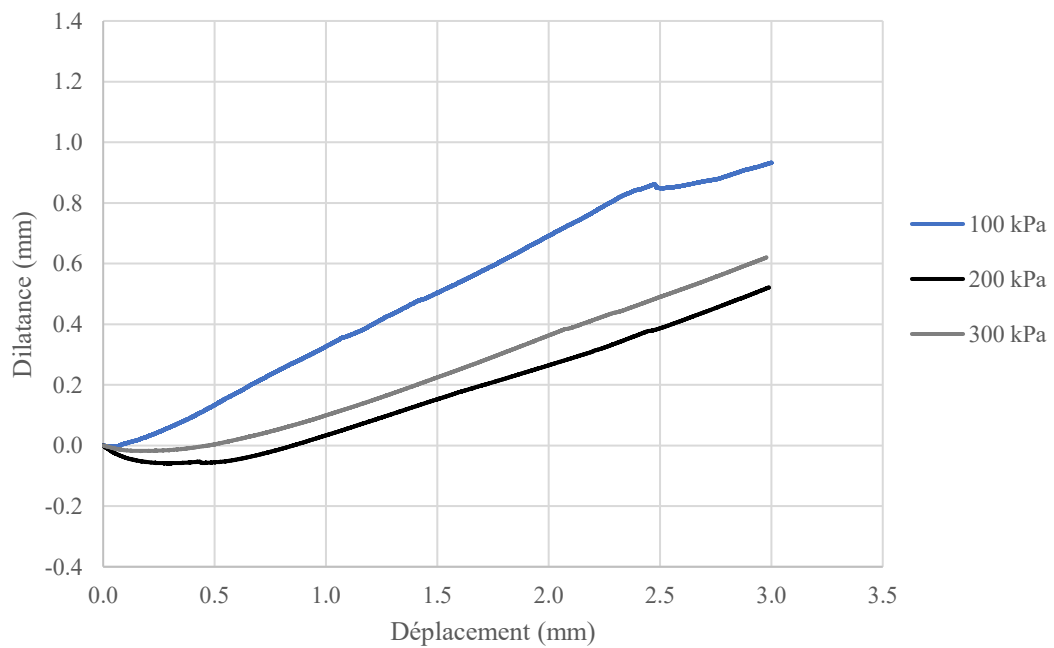


Figure C.18 – Dilatance d'un échantillon mortier-coulis dégradé durant 14 jours avec de l'acide

Dégradé 28 jours

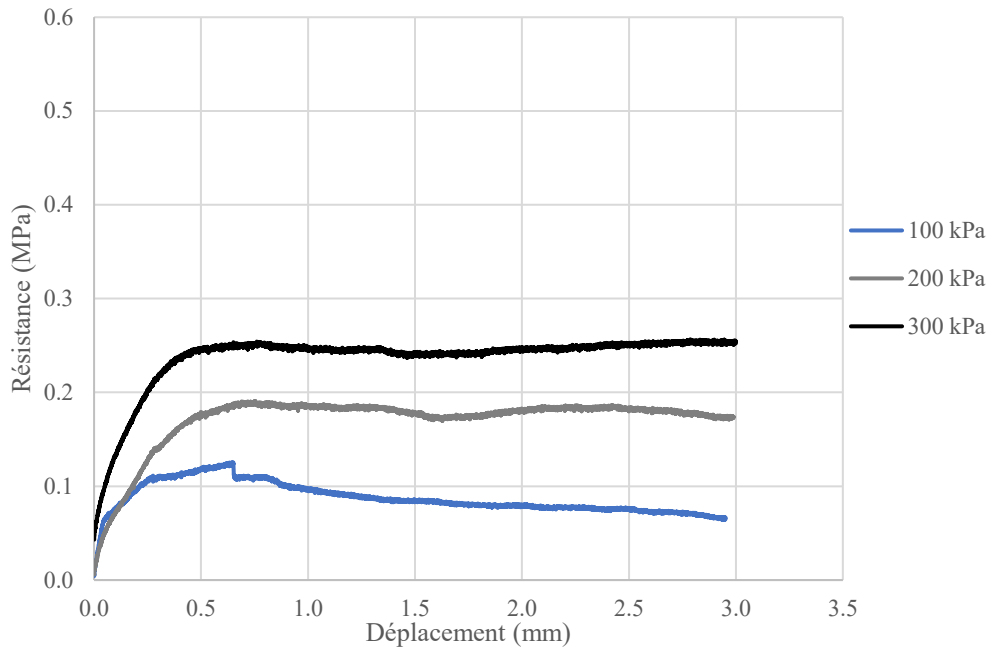


Figure C.19 – Résistance au cisaillement mortier-coulis dégradé durant 28 jours avec de l'acide

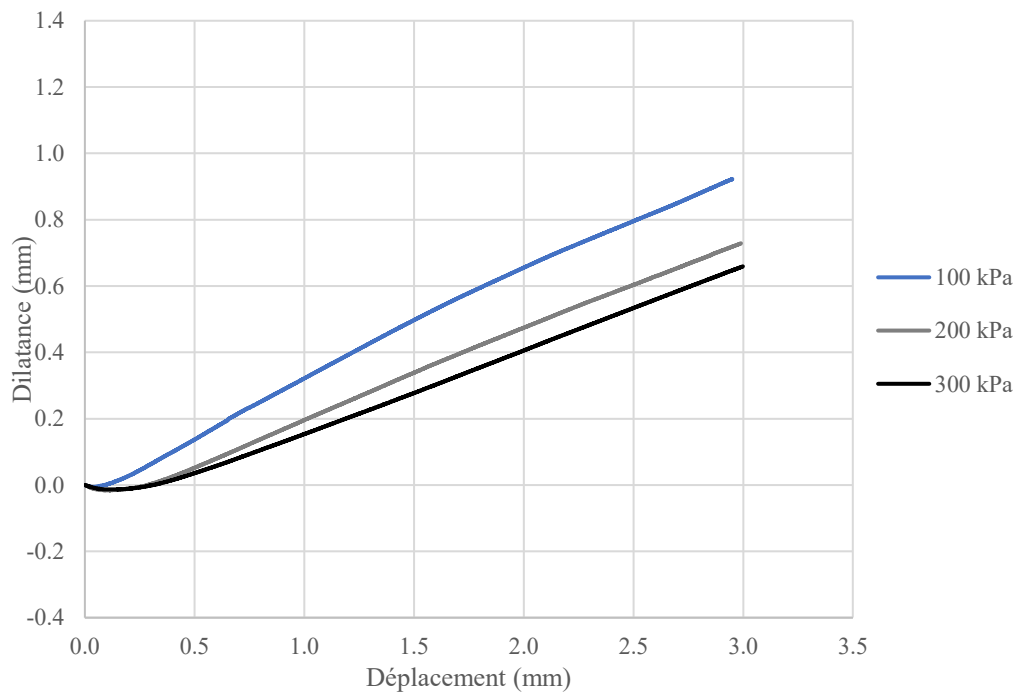


Figure C.20 – Dilatance d'un échantillon mortier-coulis dégradé durant 28 jours avec de l'acide

Dégradé 42 jours

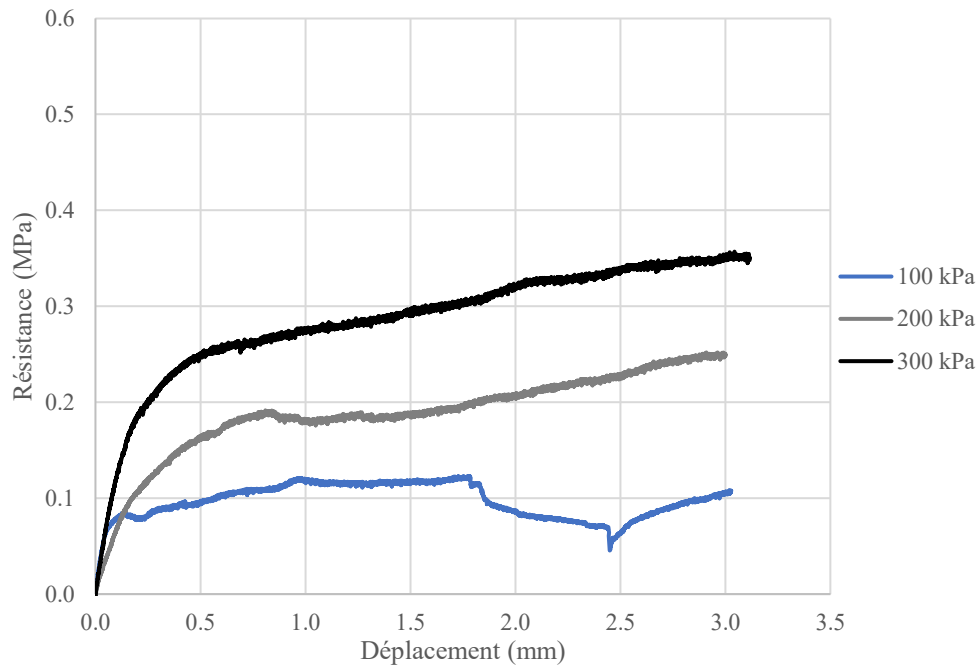


Figure C.21 – Résistance au cisaillement mortier-coulis dégradé durant 42 jours avec de l'acide

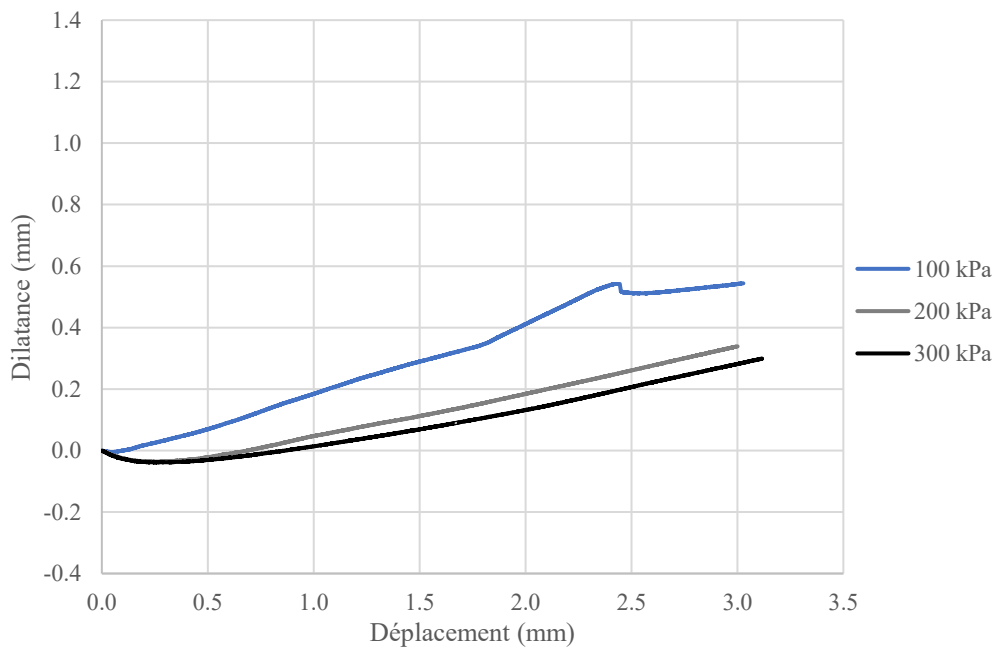


Figure C.22 – Dilatance d'un échantillon mortier-coulis dégradé durant 42 jours avec de l'acide

Dégradé 56 jours – Échantillon 1

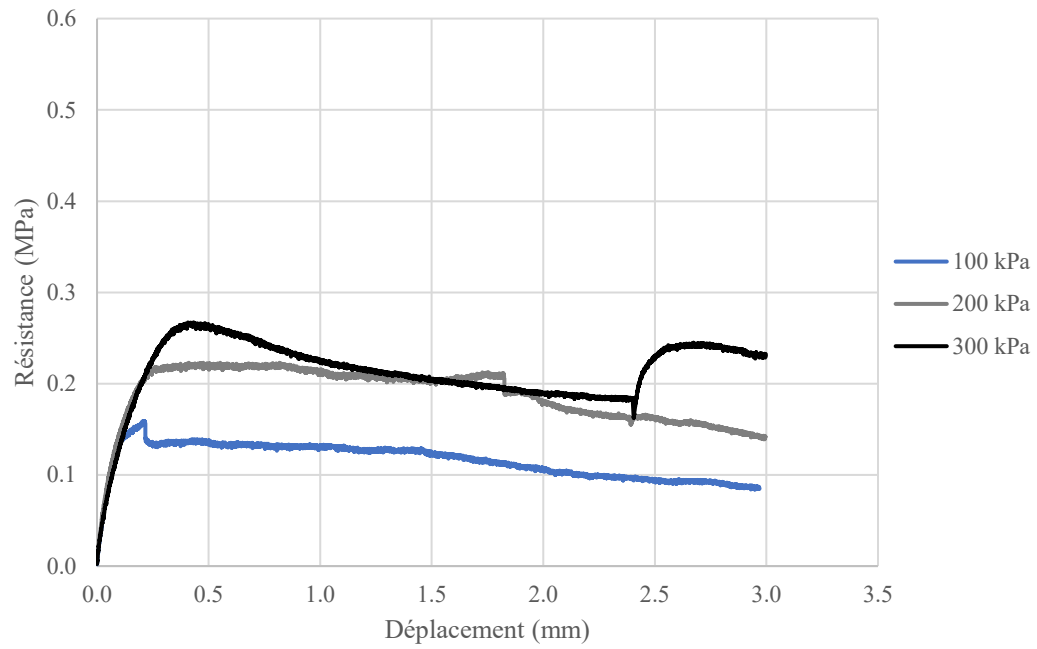


Figure C.23 – Résistance au cisaillement mortier-coulis dégradé durant 56 jours avec de l'acide

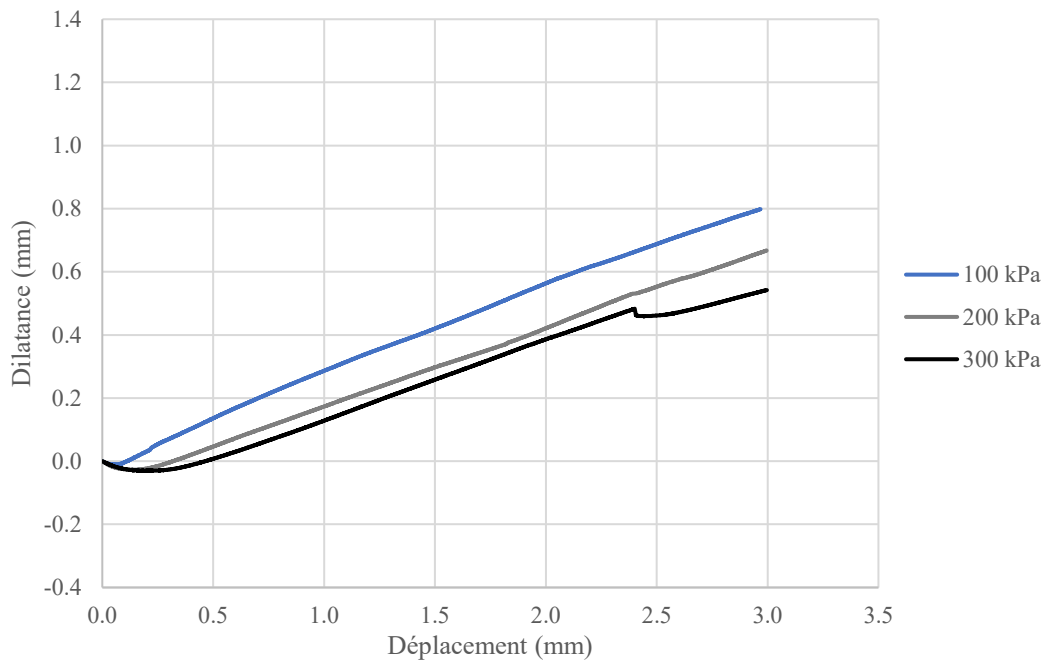


Figure C.24 – Dilatance d'un échantillon mortier-coulis dégradé durant 56 jours avec de l'acide

Dégradé 56 jours – Échantillon 2

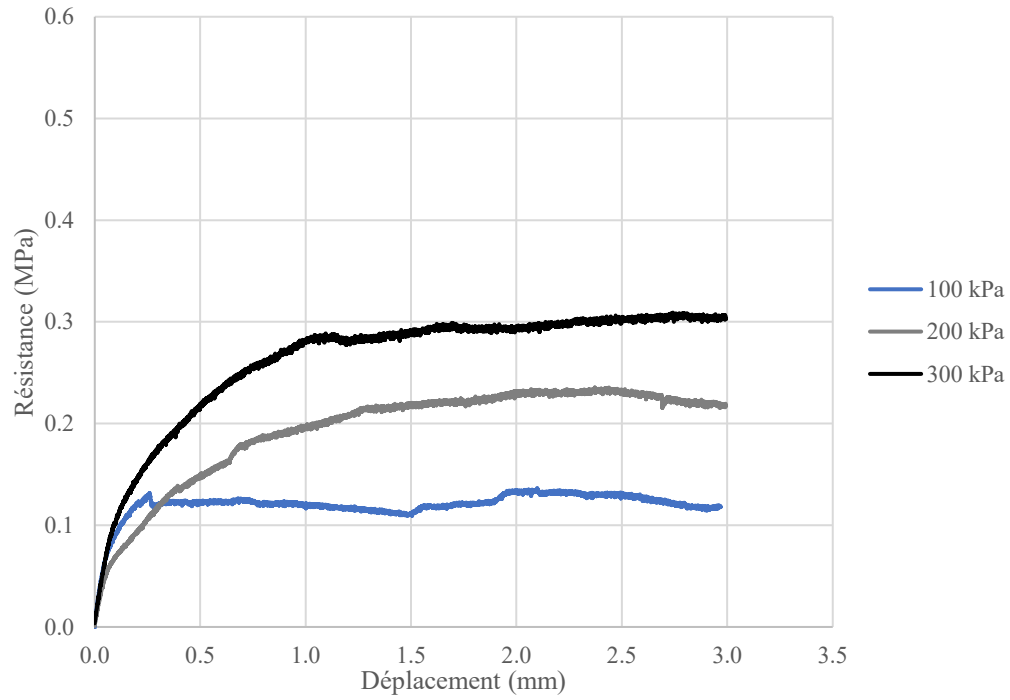


Figure C.25 – Résistance au cisaillement mortier-coulis dégradé durant 56 jours avec de l'acide

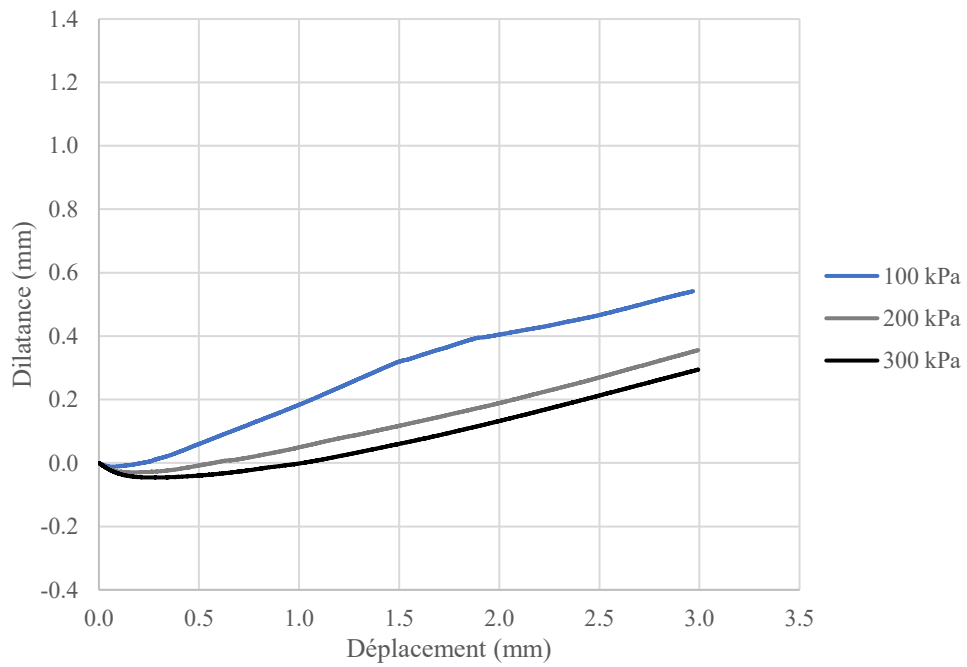


Figure C.26 – Dilatance d'un échantillon mortier-coulis dégradé durant 56 jours avec de l'acide

C.2 Résultats des directs cisaillement des éprouvettes roc-coulis

C.2.1 Échantillons non dégradés

Témoin 1

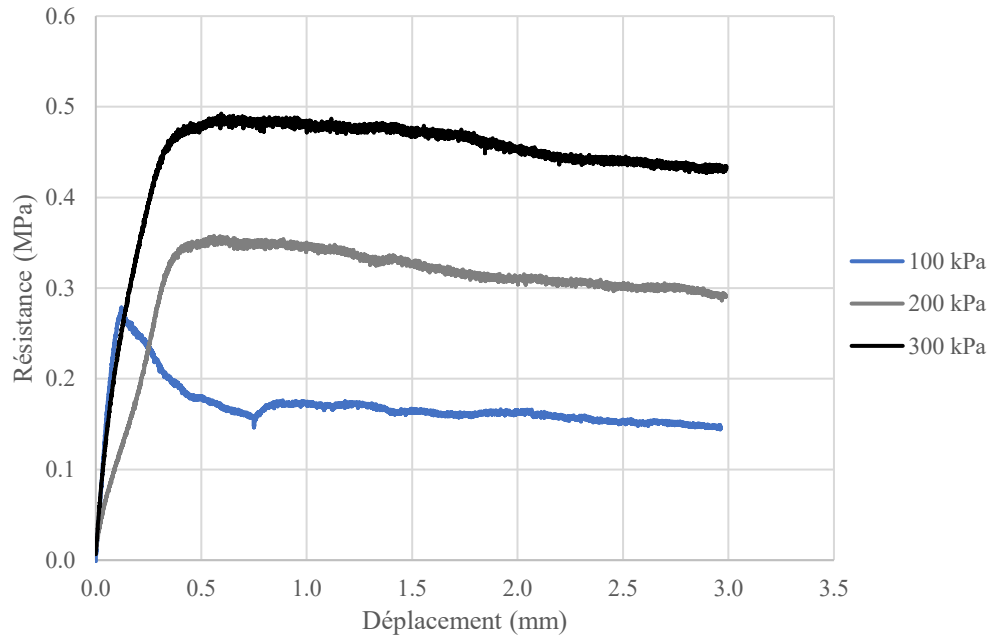


Figure C.27 – Résistance au cisaillement d'un échantillon roc-coulis non dégradé

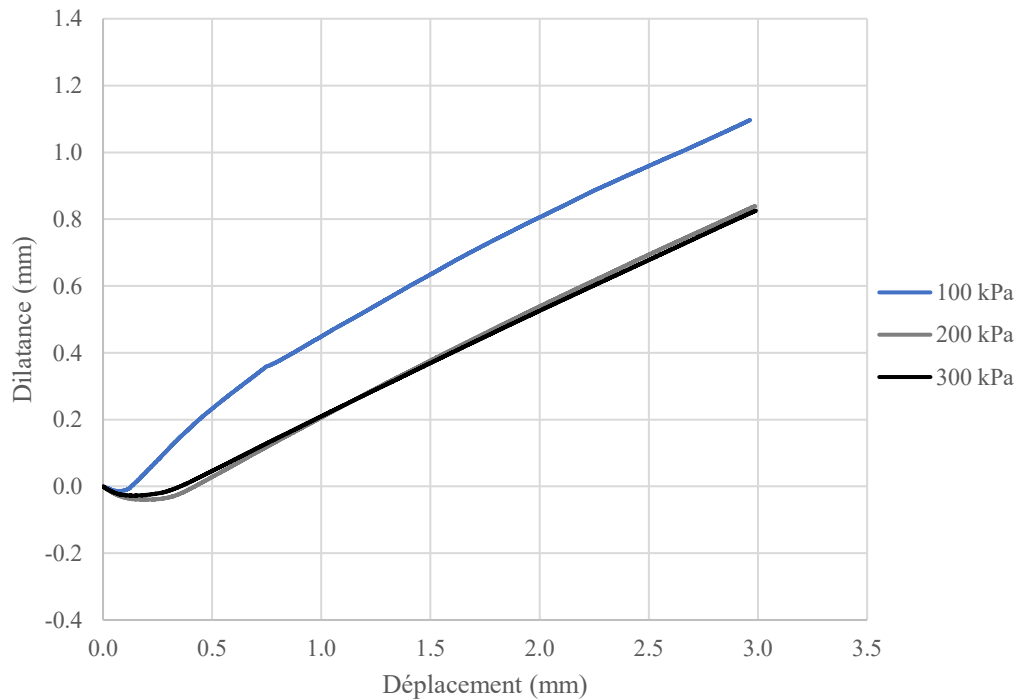


Figure C.28 – Dilatance d'un échantillon roc-coulis non dégradé

Témoïn 1

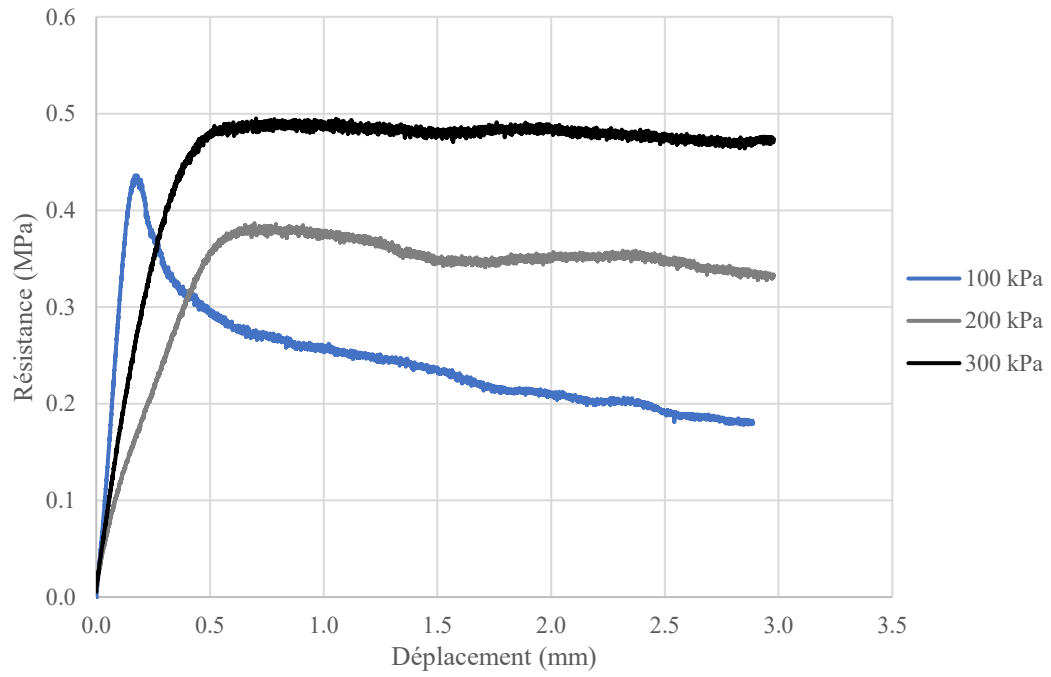


Figure C.29 – Résistance au cisaillement d'un échantillon roc-coulis non dégradé

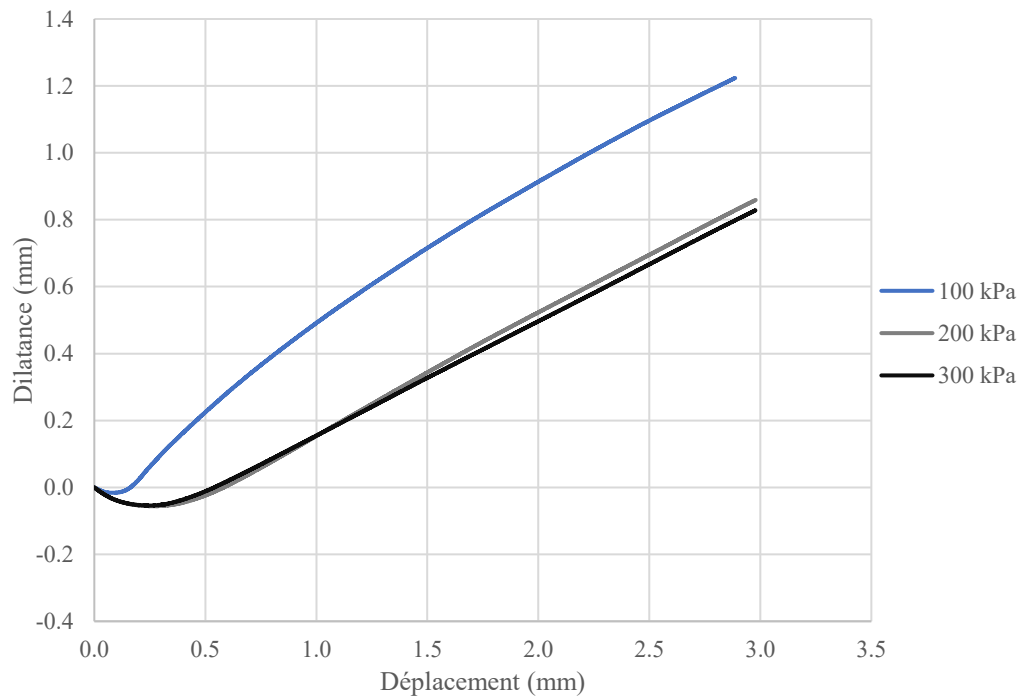


Figure C.30 – Dilatance d'un échantillon roc-coulis non dégradé

Témoignage 2

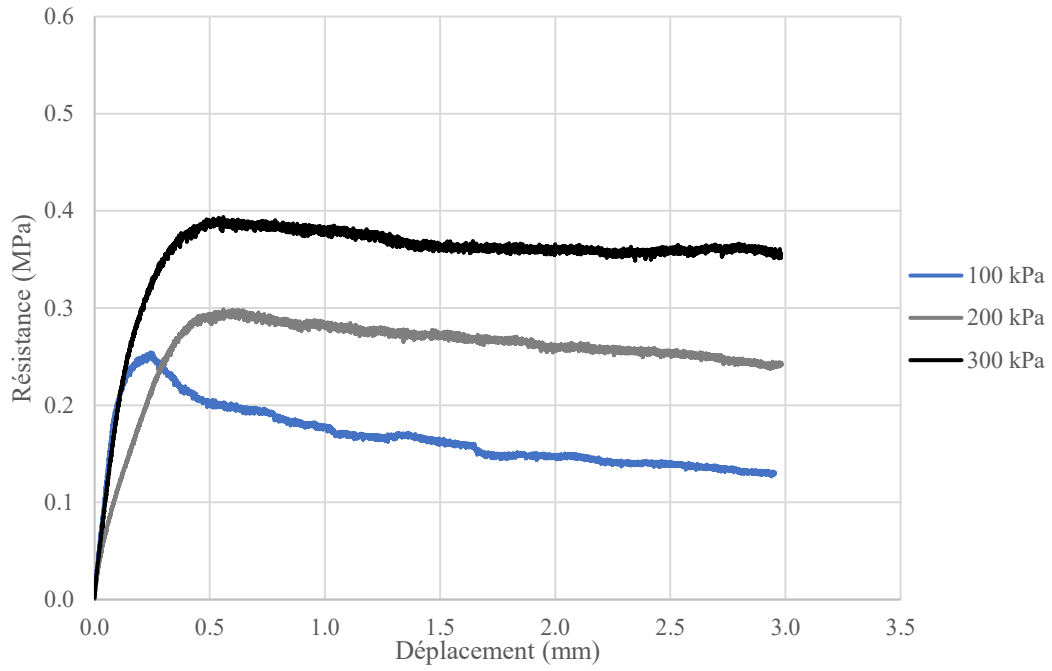


Figure C.31 – Résistance au cisaillement d'un échantillon roc-coulis non dégradé

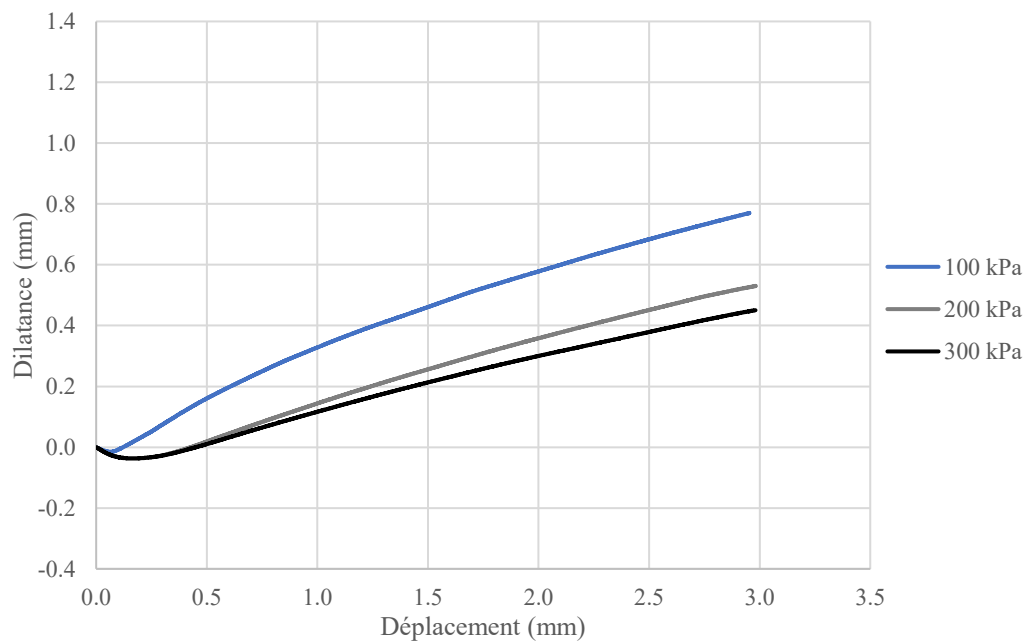


Figure C.32 – Dilatance d'un échantillon roc-coulis non dégradé

C.2.2 Échantillons dégradés à l'eau

Dégradé 14 jours

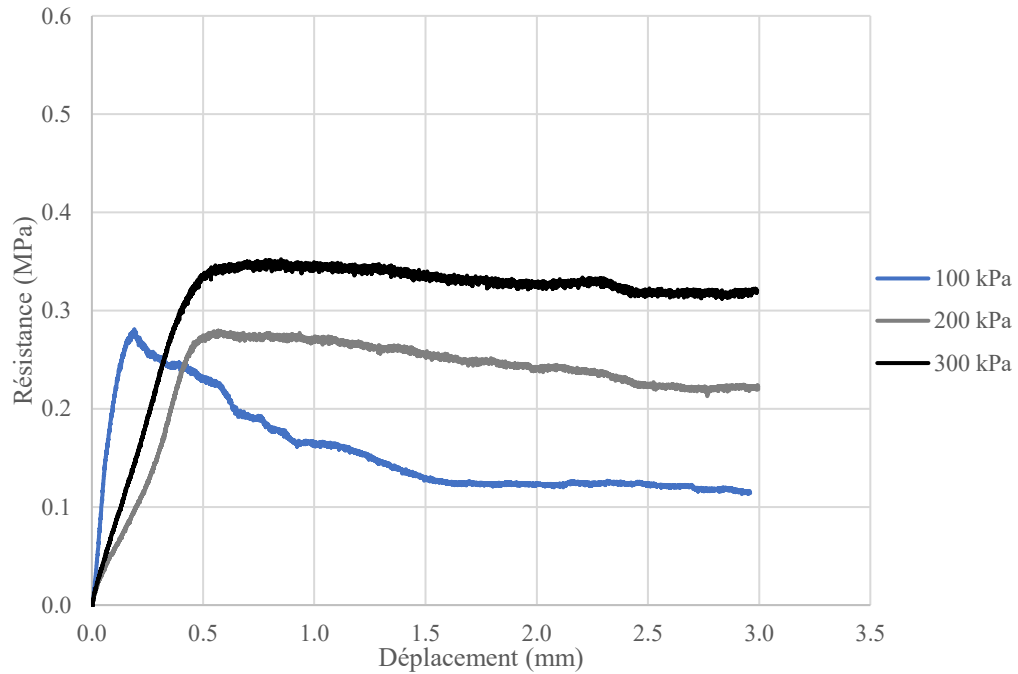


Figure C.33 – Résistance au cisaillement d'un échantillon roc-coulis dégradé durant 14 jours avec de l'eau

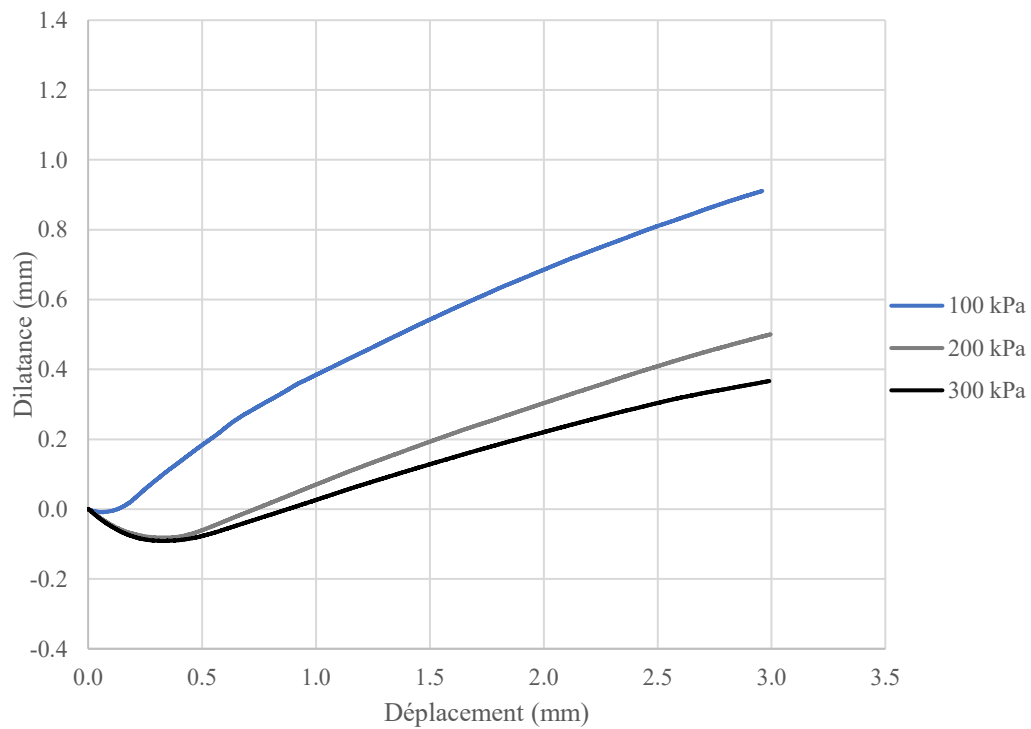


Figure C.34 – Dilatance d'un échantillon roc-coulis dégradé durant 14 jours avec de l'eau

Dégradé 28 jours

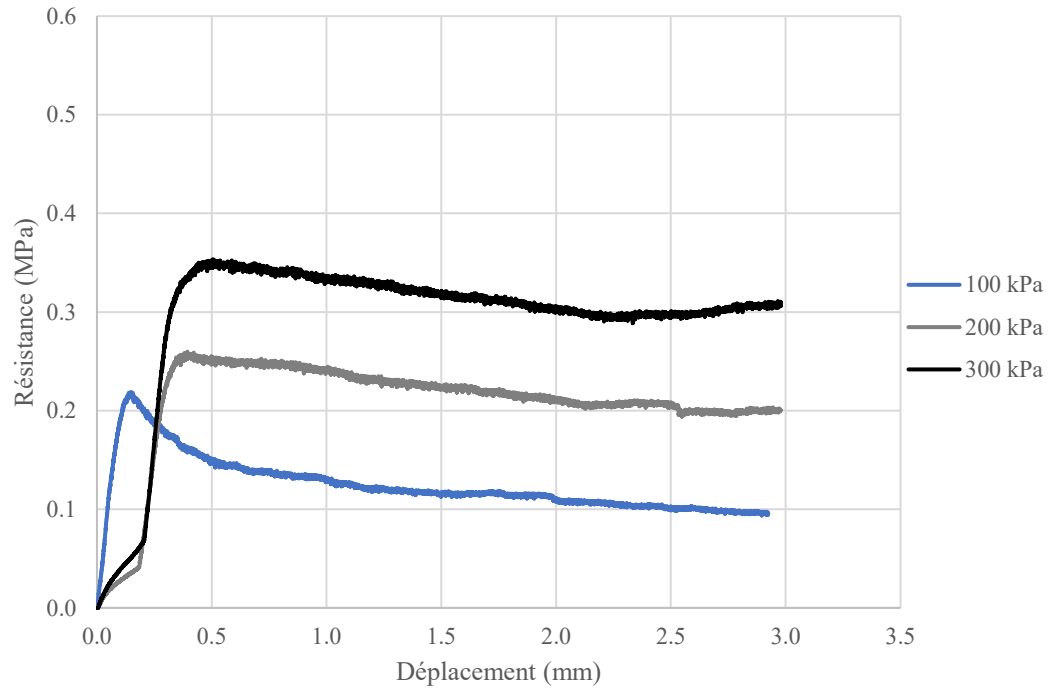


Figure C.35 – Résistance au cisaillement d'un échantillon roc-coulis dégradé durant 28 jours avec de l'eau

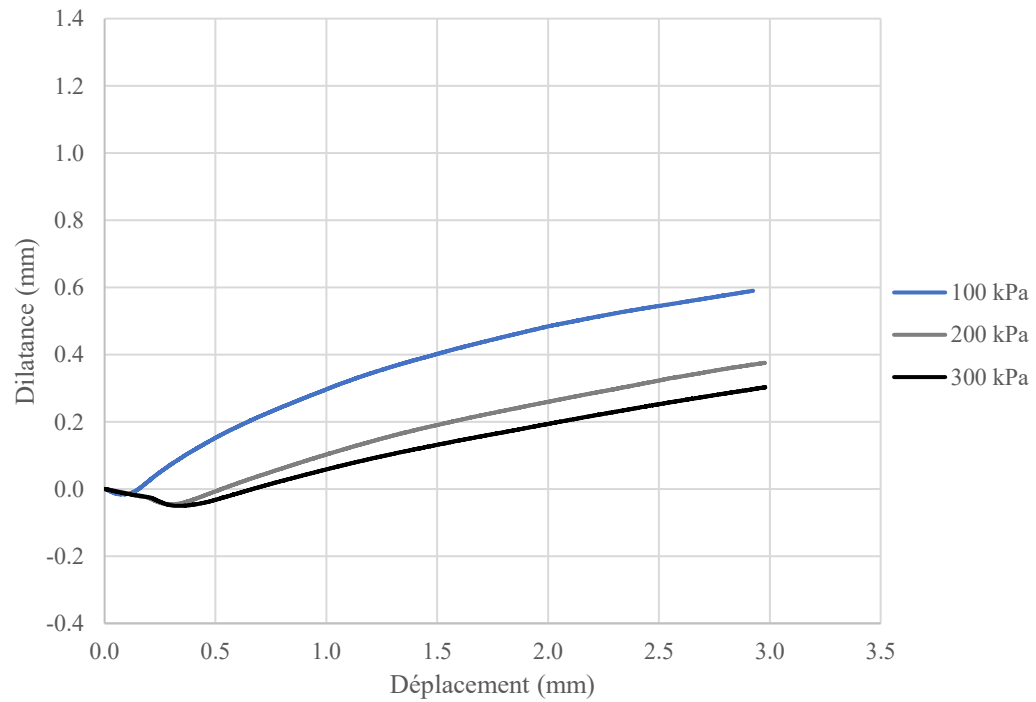


Figure C.36 – Dilatance d'un échantillon roc-coulis dégradé durant 28 jours avec de l'eau

Dégradé 42 jours

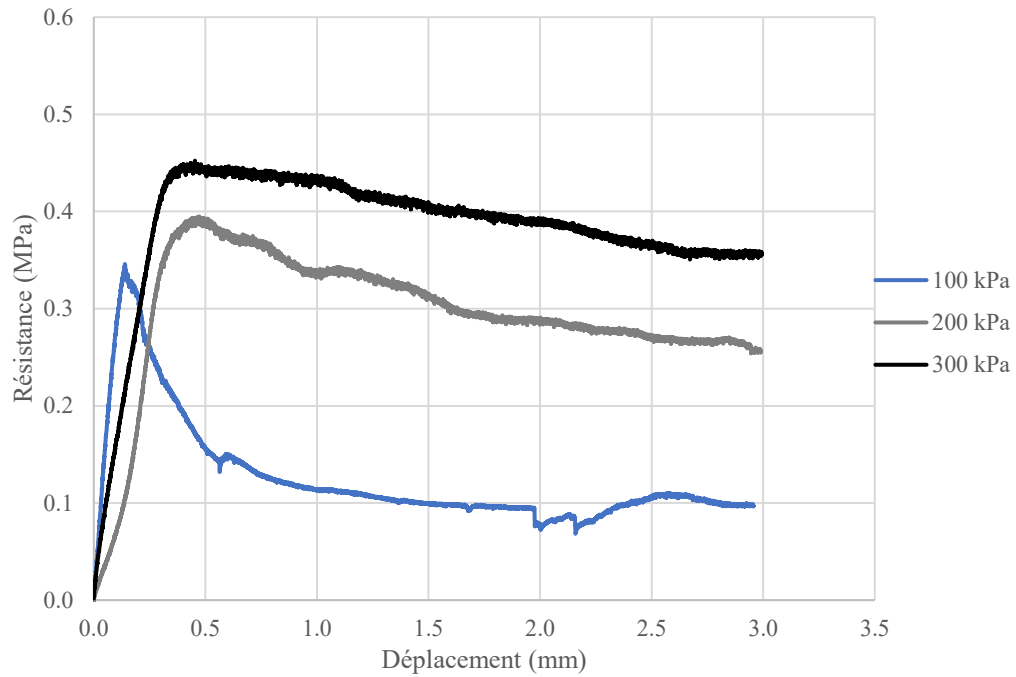


Figure C.37 – Résistance au cisaillement d'un échantillon roc-coulis dégradé durant 42 jours avec de l'eau

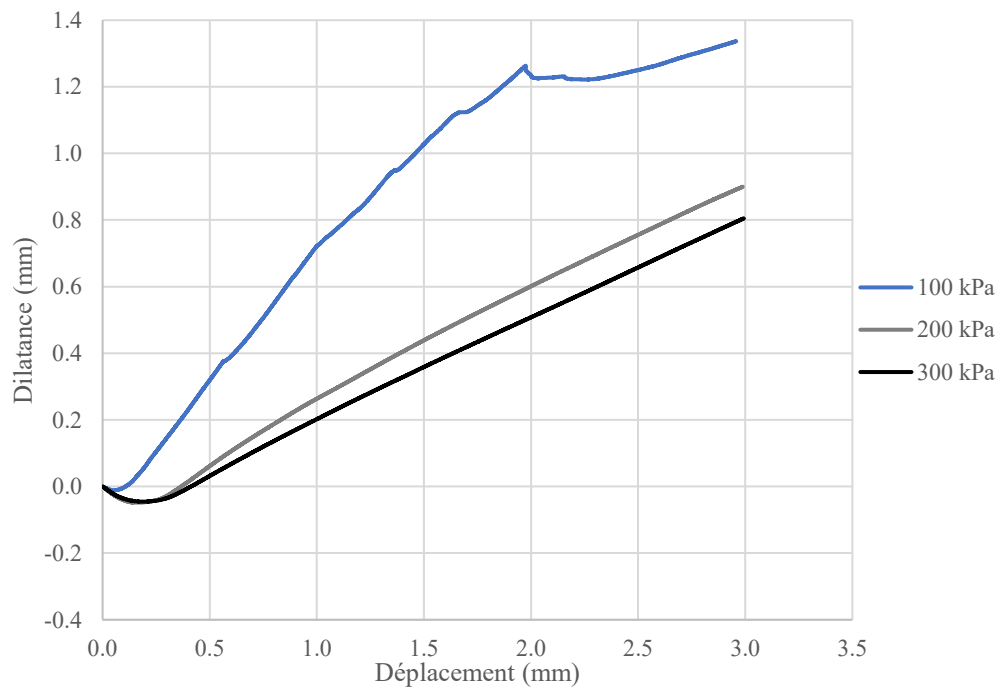


Figure C.38 – Dilatance d'un échantillon roc-coulis dégradé durant 42 jours avec de l'eau

Dégradé 56 jours – Échantillon 1

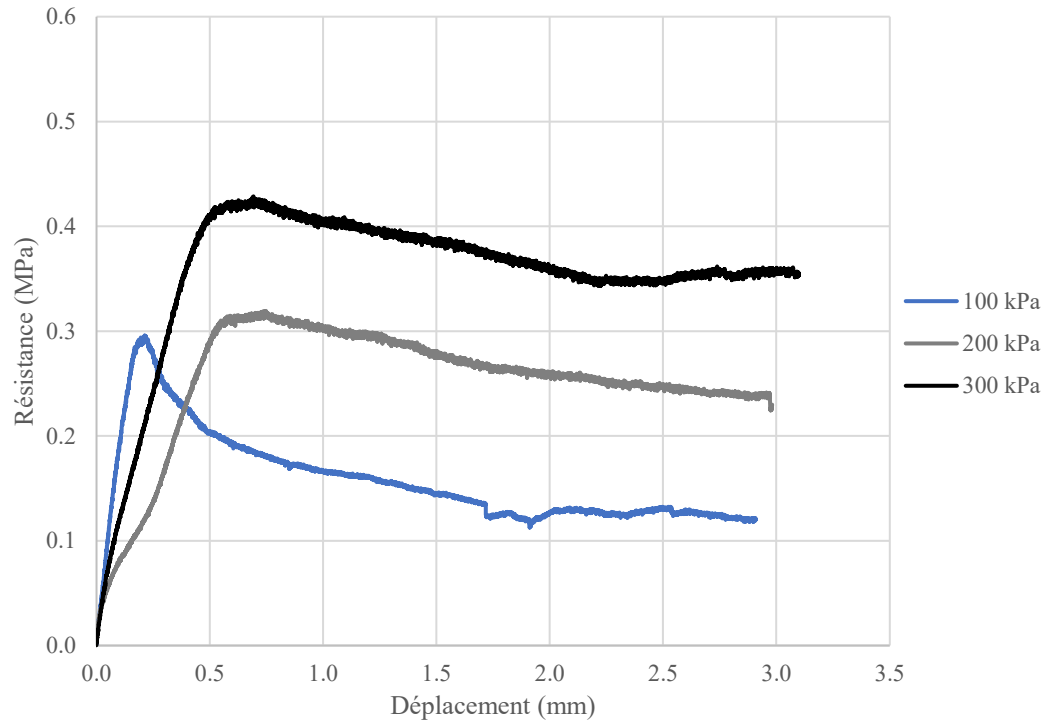


Figure C.39 – Résistance au cisaillement d'un échantillon roc-coulis dégradé durant 56 jours avec de l'eau

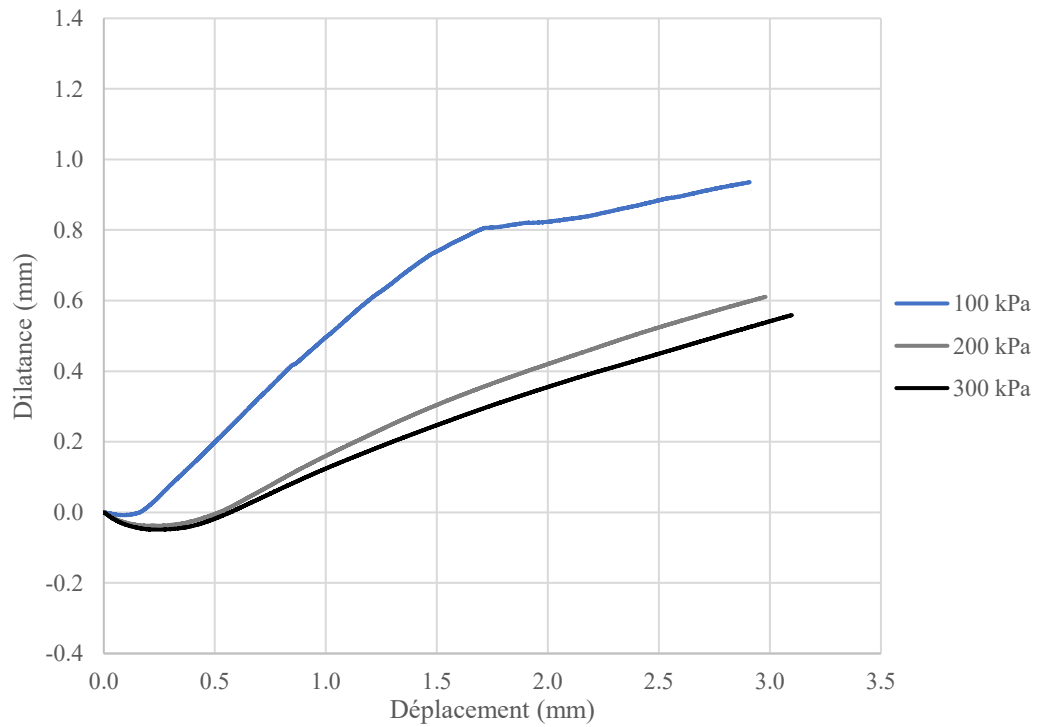


Figure C.40 – Dilatance d'un échantillon roc-coulis dégradé durant 56 jours avec de l'eau

Dégradé 56 jours – Échantillon 2

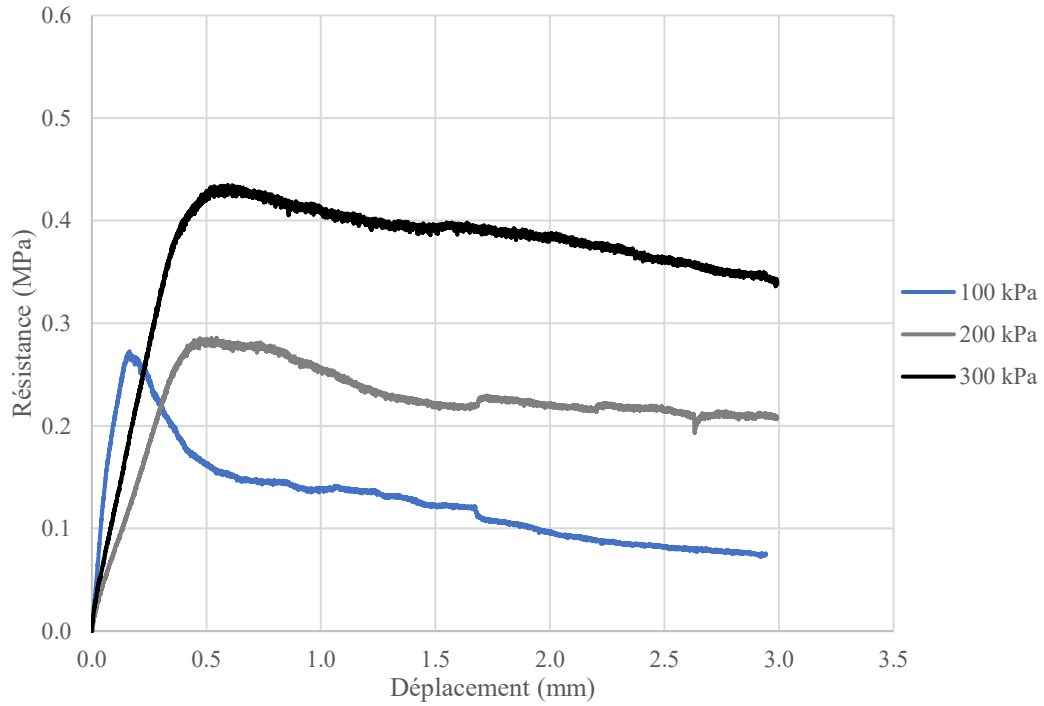


Figure C.41 – Résistance au cisaillement d'un échantillon roc-coulis dégradé durant 56 jours avec de l'eau

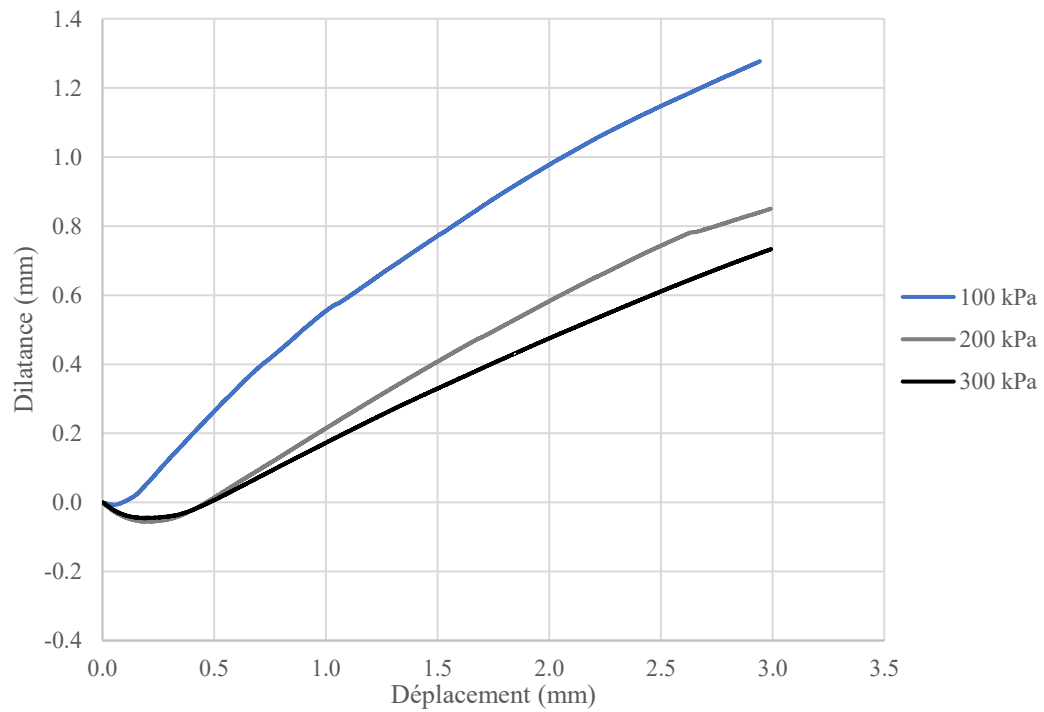


Figure C.42 – Dilatance d'un échantillon roc-coulis dégradé durant 56 jours avec de l'eau

C.2.3 Échantillons dégradés à l'acide

Dégradé 14 jours

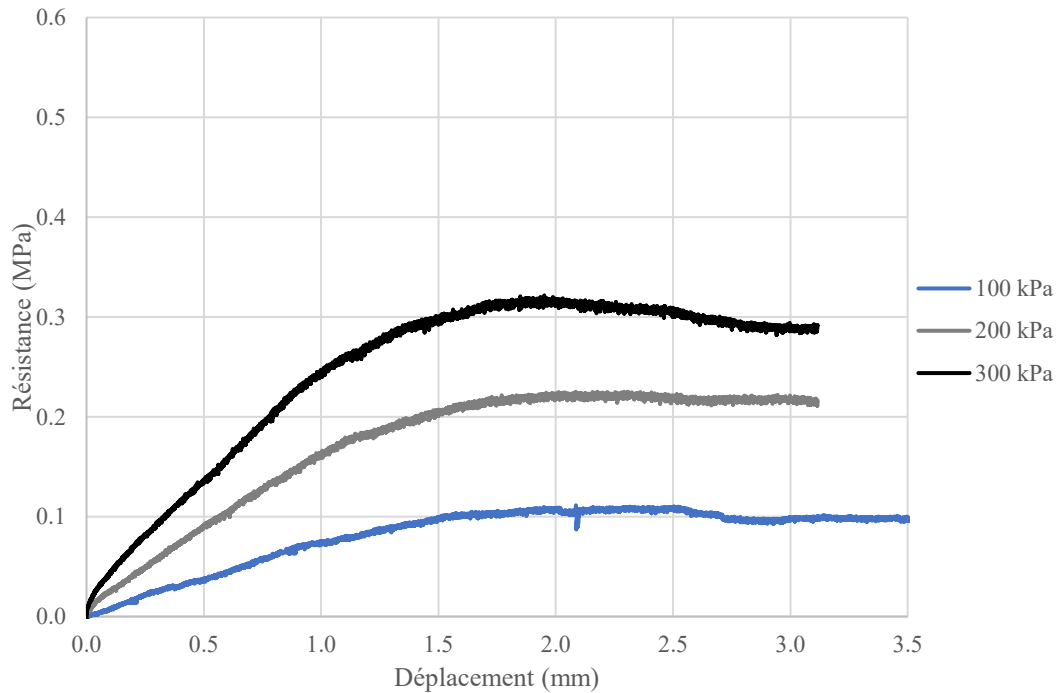


Figure C.43 – Résistance au cisaillement d'un échantillon roc-coulis dégradé durant 14 jours avec de l'acide

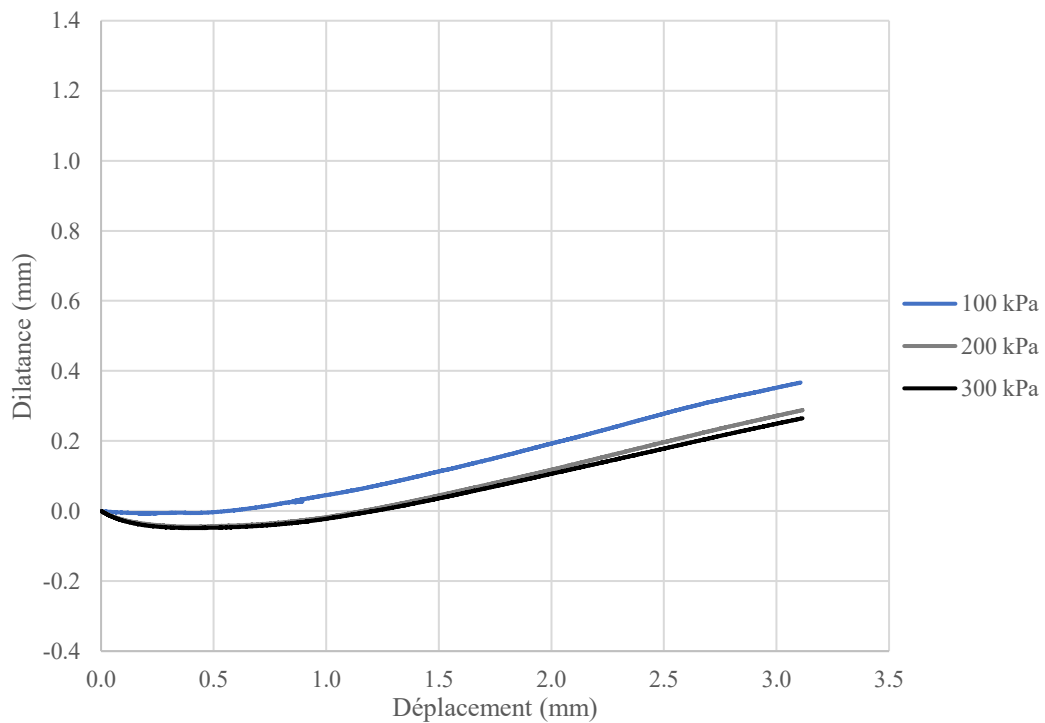


Figure C.44 – Dilatance d'un échantillon roc-coulis dégradé durant 14 jours avec de l'acide

Dégradé 28 jours

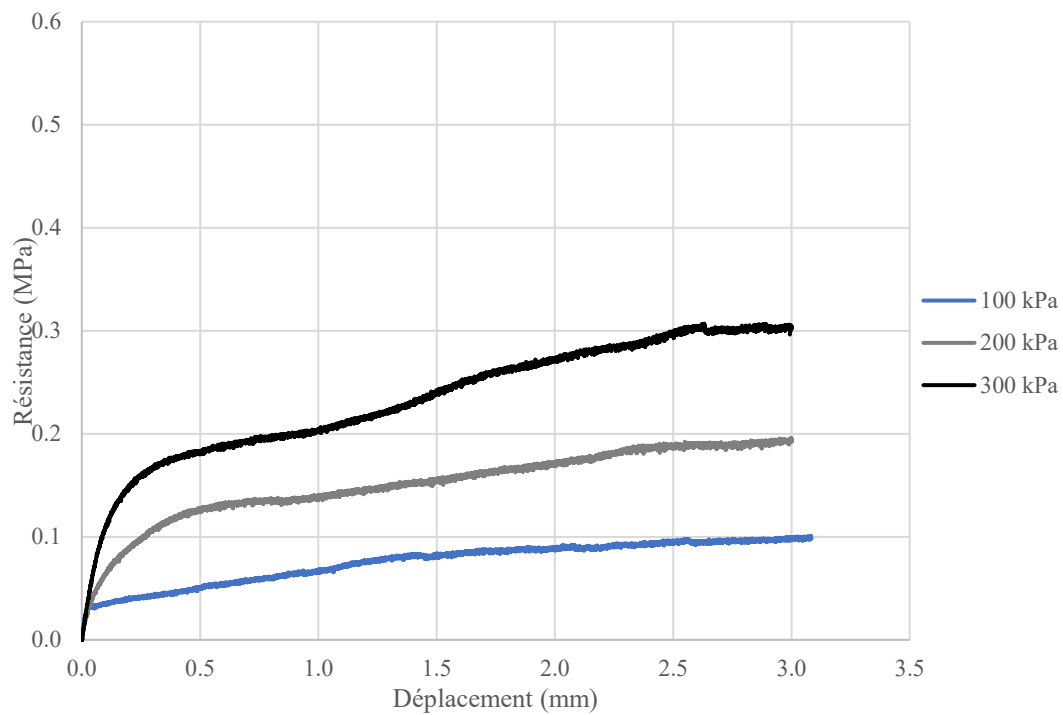


Figure C.45 – Résistance au cisaillement d'un échantillon roc-coulis dégradé durant 28 jours avec de l'acide

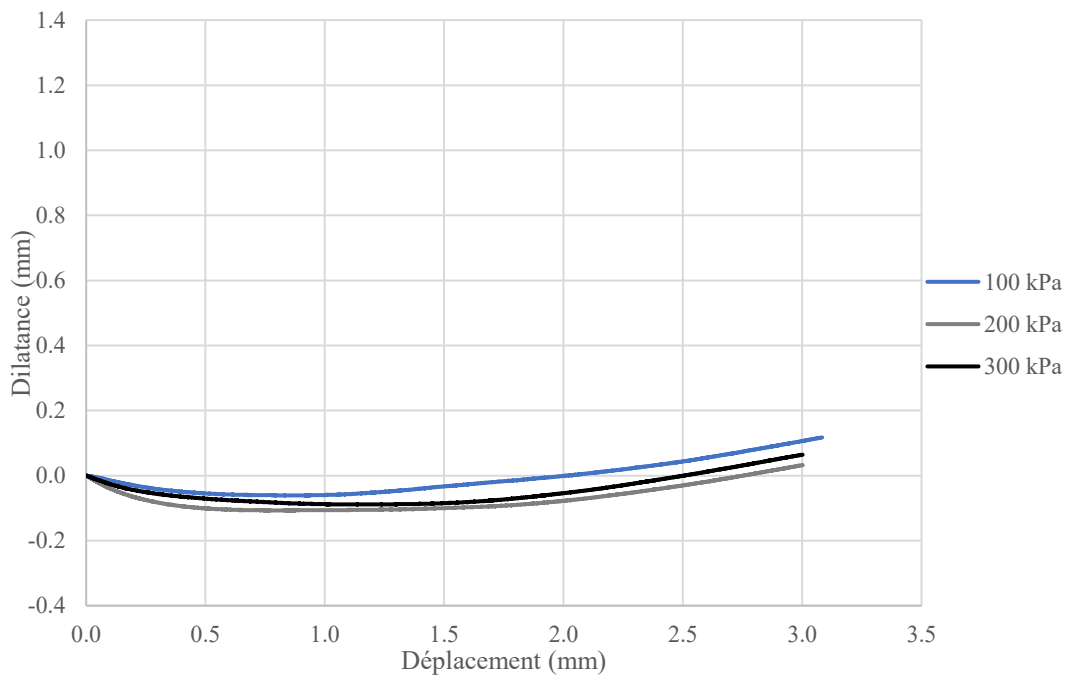


Figure C.46 – Dilatance d'un échantillon roc-coulis dégradé durant 28 jours avec de l'acide

Dégradé 42 jours

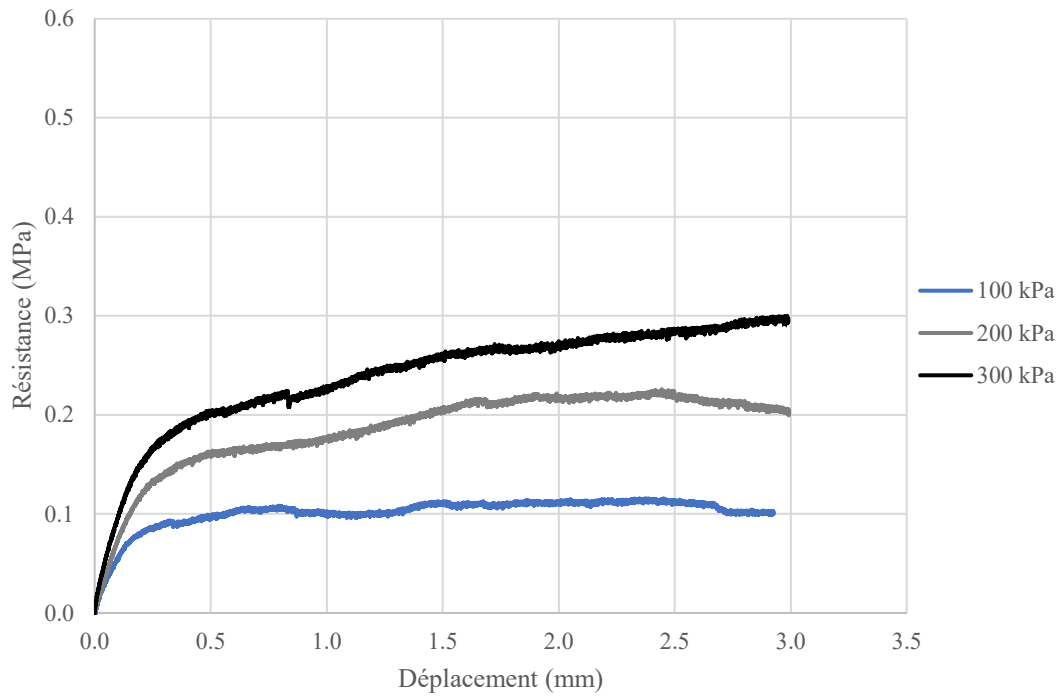


Figure C.47 – Résistance au cisaillement d'un échantillon roc-coulis dégradé durant 42 jours avec de l'acide

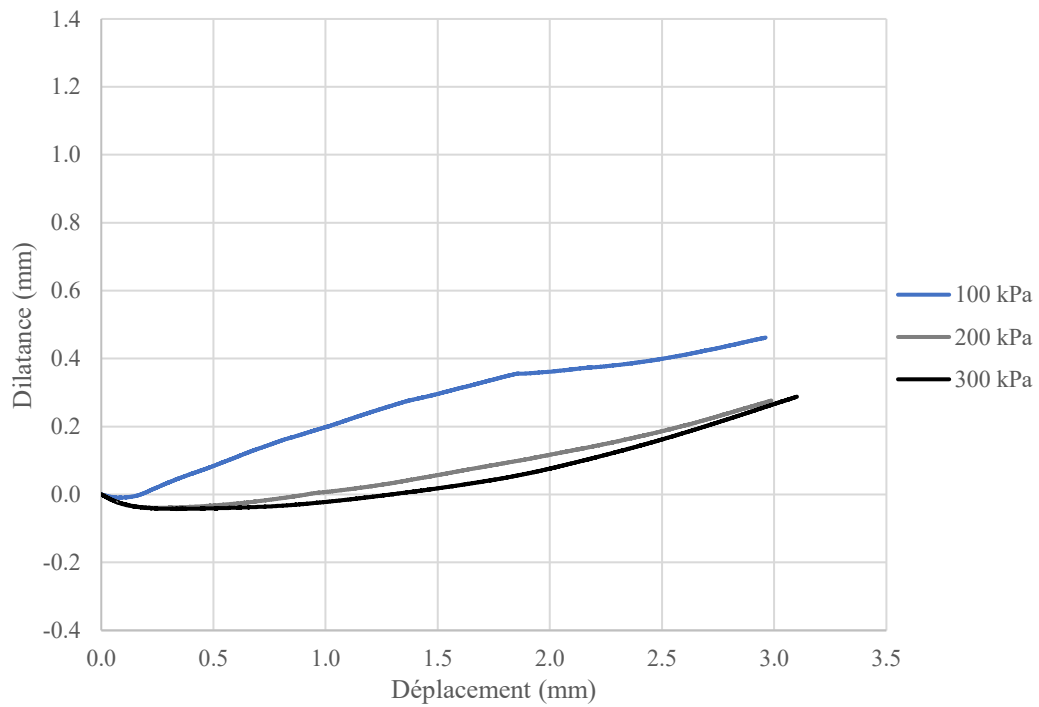


Figure C.48 – Dilatance d'un échantillon roc-coulis dégradé durant 42 jours avec de l'acide

Dégradé 56 jours – Échantillon 1

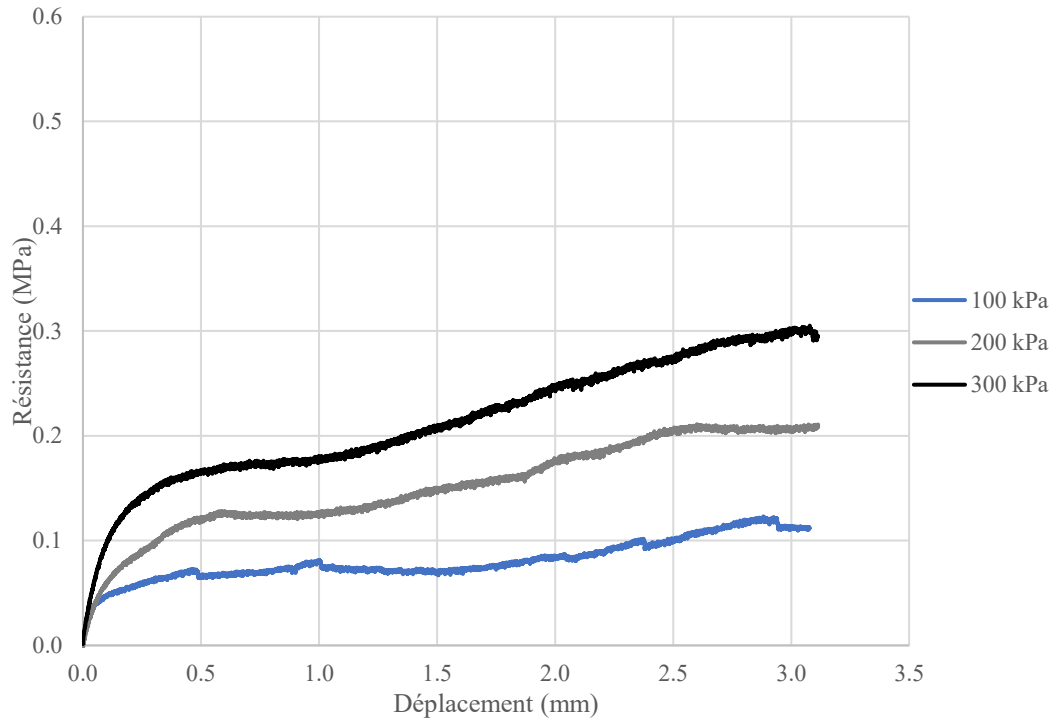


Figure C.49 – Résistance au cisaillement d'un échantillon roc-coulis dégradé durant 56 jours avec de l'acide

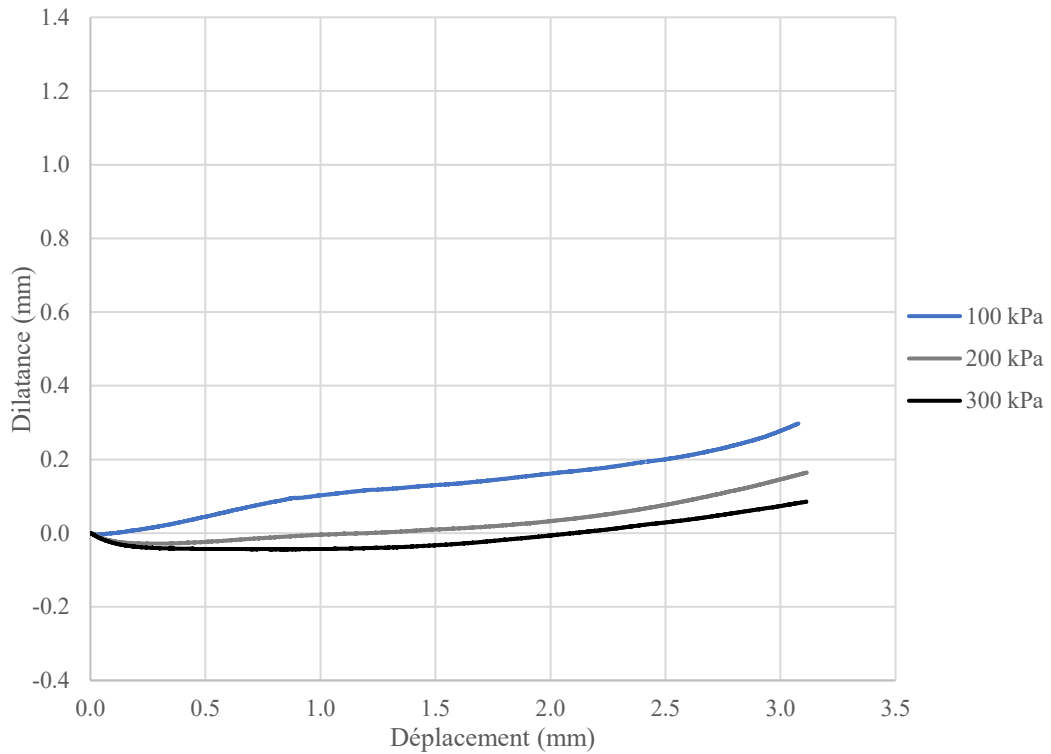


Figure C.50 – Dilatance d'un échantillon roc-coulis dégradé durant 56 jours avec de l'acide

Dégradé 56 jours – Échantillon 2

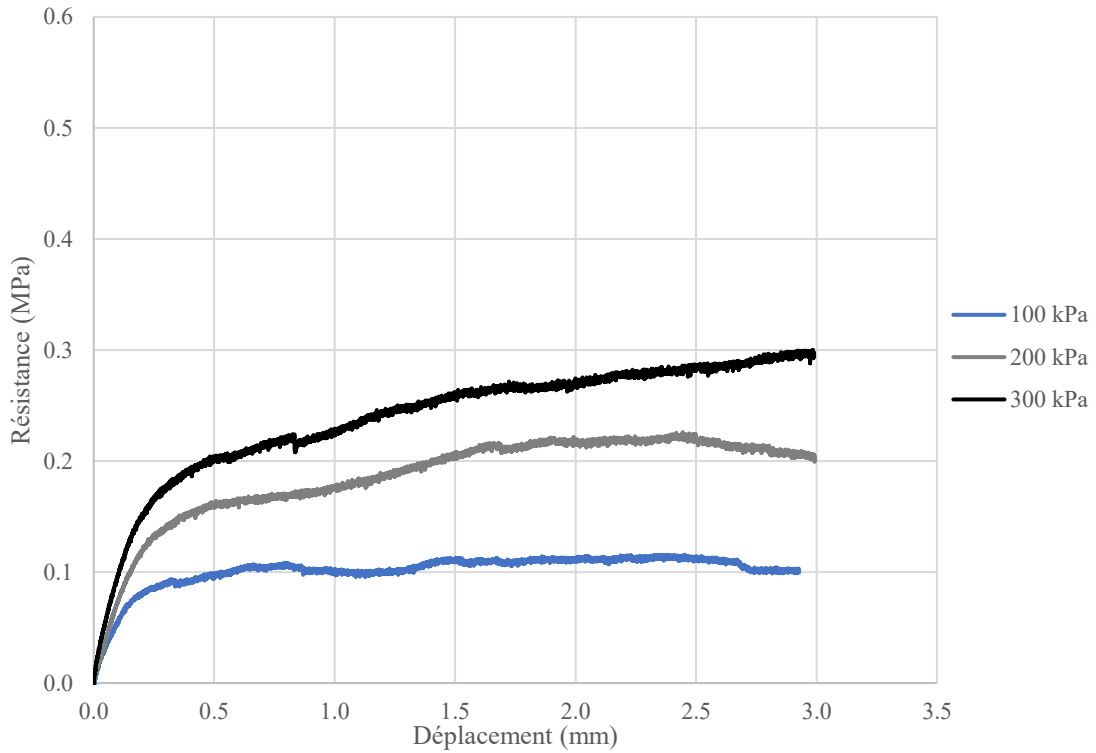


Figure C.51 – Résistance au cisaillement d'un échantillon roc-coulis dégradé durant 56 jours avec de l'acide

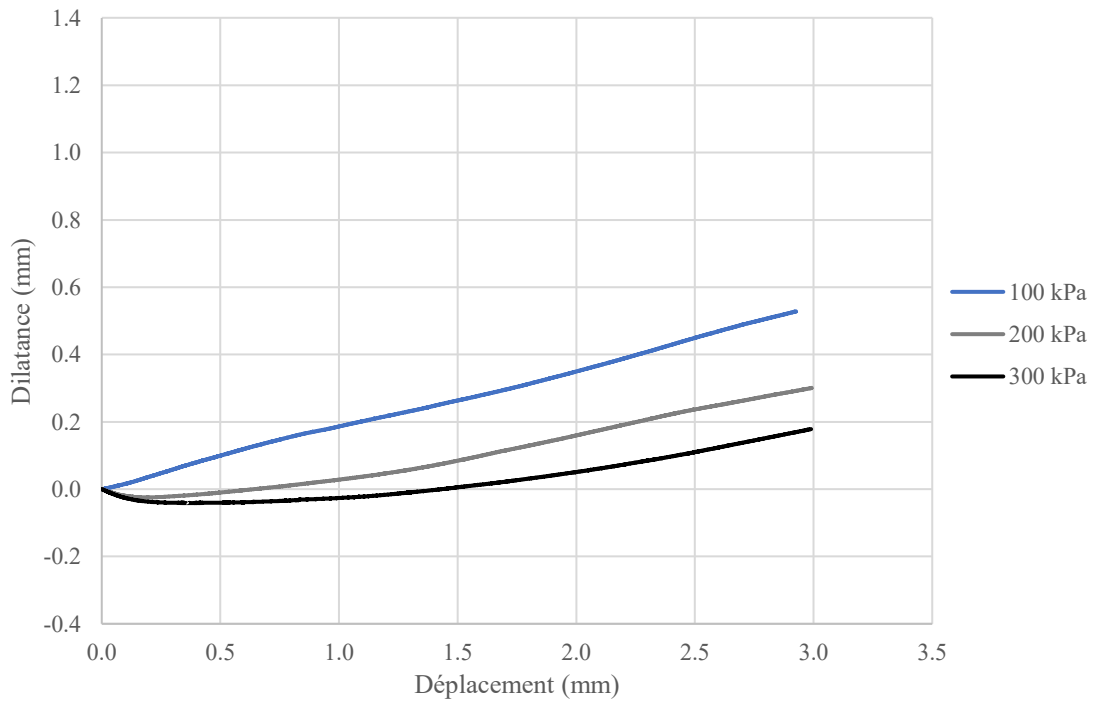


Figure C.52 – Dilatance d'un échantillon roc-coulis dégradé durant 56 jours avec de l'acide