

21^e édition des Journées scientifiques
du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton
(RF)²B

Polytechnique Montréal, Montréal, Canada
5 et 6 juillet 2023

AUTOCICATRISATION DE BETONS CONTENANT DIFFERENTS AJOUTS, SOUMIS A DES CONDITIONS DE LABORATOIRE ET AU CLIMAT HIVERNAL CANADIEN

K.-S. Lauch^A, C. Desmettre^A, J.-P. Charron^A

A Département des génies civil, géologique et des mines, Polytechnique Montréal, Québec, Canada

RÉSUMÉ : Ce projet présente l'évaluation de l'autocicatrisation de bétons renforcés de fibres contenant différents ajouts (ajout cristallin CA, agent expansif CSA, polymère superabsorbant SAP). Ces bétons ont été exposés à plusieurs conditions de laboratoire (immersion sous eau, cycles de mouillage-séchage, air ambiant) pendant 3 mois, ainsi que soumis au climat canadien pendant 1 an. La capacité d'autocicatrisation a été déterminée via des mesures de perméabilité à l'eau, de regain mécanique et d'observations macroscopiques sur les mêmes prismes présentant une fissure réaliste de flexion. Des analyses microscopiques des produits de cicatrisation ont également été réalisées, ce qui a permis de relever l'impact de la condition d'exposition sur la nature et la densité des produits de cicatrisation et par conséquent, sur différentes propriétés mécaniques et de durabilité. Les regains mécaniques les plus élevés (109% en moyenne) ont été obtenus pour les spécimens exposés à l'extérieur qui ont présenté les regains de cicatrisation les plus faibles (71% en moyenne). Le mélange contenant le SAP a montré la meilleure performance globale d'autocicatrisation.

1. INTRODUCTION

L'ampleur des travaux de maintenance et de réparation des structures en béton, ainsi que les coûts associés constituent un enjeu majeur de notre société. En Amérique du Nord, 20 milliards de dollars sont dépensés chaque année pour maintenir, réparer et remplacer les structures détériorées (Li & Herbert 2012). Au Québec, 25% des ponts du Ministère des Transports du Québec sont dégradés, représentant un coût de 2,6 milliards de dollars chaque année pour leur réparation (Ministère des Transports du Québec 2019).

Bien que les recherches sur l'autocicatrisation du béton se sont multipliées ces dix dernières années, les études sur la cicatrisation de fissures sous des conditions réalistes sont encore limitées. Le phénomène d'autocicatrisation du béton a majoritairement été investigué dans des conditions contrôlées de laboratoire : immersion sous eau, chambre humide, cycles de mouillage-séchage (Roig-Flores et al. 2015). Il est nécessaire d'examiner l'autocicatrisation du béton dans des conditions réelles d'exposition à long terme, impliquant une large gamme de températures et de précipitations.

De plus, comme il n'existe pas encore de méthode d'essai normalisée pour évaluer la capacité d'autocicatrisation du béton, une panoplie d'essais sont utilisés dans la littérature (mesure d'ouverture de fissure en surface, mesure de la perméabilité à l'eau, test d'absorption, essai de flexion, de compression, essai d'impulsion ultrasonore, analyse des produits de cicatrisation...). De plus, les essais sont réalisés sur des spécimens avec différentes géométries, différents types de fissure, d'ouvertures variées, d'âge de préfissuration et de conditions d'exposition différentes (Ferrara et al. 2018). Ces méthodologies variées

permettent de donner un bon aperçu de la contribution et de l'efficacité de l'autocicatrisation du béton, mais les divergences dans les conditions d'essais rendent l'interprétation des tendances ardue. Cela explique également le manque de consensus sur la performance de certains ajouts, comme l'ajout cristallin (CA), et de combinaisons avec d'autres produits qui présenteraient des synergies potentielles, comme avec l'agent expansif CSA (Sisomphon et al. 2013) ou le polymère superabsorbant SAP.

La plupart des études se concentrent soit sur le regain de perméabilité, soit le regain mécanique, mais rarement sur ces deux aspects. Les chercheurs qui ont évalué à la fois les propriétés de durabilité et mécanique ont souvent employé différents spécimens pour ces essais, ce qui signifie différentes fissures. La détermination à la fois de propriétés de durabilité et mécanique sur le même spécimen, et donc la même fissure) permettrait une comparaison directe entre un état de cicatrisation et une reprise mécanique. Ainsi, l'objectif principal de ce projet de recherche était d'évaluer la cicatrisation du béton renforcé de fibres (BRF) contenant différents ajouts (CA, CSA, SAP) de manière très détaillée et dans les conditions réelles extérieures du climat canadien.

2. PROGRAMME EXPERIMENTAL

2.1 Matériaux

Six mélanges de béton renforcés de fibres (BRF), avec un rapport eau sur liant de 0.43 et 0.75% en volume de macrofibres d'acier ($l_f = 35$ mm et $\varphi_f = 0.55$ mm) ont été produits : un mélange de référence (Contrôle) et des mélanges contenant un ajout cristallin (CA), un agent expansif de type calcium sulfoaluminate (CSA), du polymère superabsorbant (SAP) ainsi que les combinaisons CA+SAP et CA+CSA. Le détail des compositions est donné au Tableau 1. Les dosages des ajouts par masse de ciment ont été recommandés par les fabricants. En raison de l'absorption d'eau du SAP, davantage de superplastifiant a été ajouté pour les mélanges contenant le SAP afin de garder une performance mécanique similaire entre tous les mélanges. Plus de détails sur les caractéristiques du SAP se trouvent dans (Lauch & Desmettre & et al. 2022).

Tableau 1. Composition des mélanges de béton et résultats de caractérisation.

Matériau	Contrôle	CSA 3.3%	CA 2%	SAP 0.5%	CA+SAP 2%+0.5%	CA+CSA 2%+3.3%
Ciment type GUb-SF (kg/m ³)	550	550	550	550	550	550
CSA (kg/m ³)	-	18.3	-	-	-	18.3
CA (kg/m ³)	-	-	11	-	11	11
SAP (kg/m ³)	-	-	-	2.75	2.75	-
Eau (kg/m ³)	237	237	237	237	237	237
Superplastifiant (l/m ³)	10.0	10.0	10.5	30.0	30.0	10.5
Agent viscosant (l/m ³)	0.70	0.85	0.71	0.70	0.70	0.85
Sable (kg/m ³)	779	771	773	767	761	765
Granulats (kg/m ³)	631	624	626	620	616	619
Fibres d'acier (kg/m ³)	58.5	58.5	58.5	58.5	58.5	58.5
Étalement (mm)	530	583	503	443	330	595
Teneur en air (%)	1.9	1.6	2.0	2.7	3.0	1.7
Densité (kg/m ³)	2326	2334	2316	2285	2268	2329
f_c 28 jours (MPa)	61.3	64.9	60.3	58	54.2	59.6
E_c 28 jours (MPa)	33100	33200	31700	29000	27500	32500

Pour ces mélanges semi-autoplaçants, un étalement de 500 mm et une résistance à la compression f_c de 50 MPa à 28 jours étaient visés. Les caractéristiques à l'état frais et à l'état durci (compression et module de Young E_c) sont également indiquées au Tableau 1. Les valeurs visées ont été atteintes pour la plupart des mélanges.

Des prismes (75 x 125 x 450 mm) et cylindres ($\varphi 100$ mm x 200 mm) ont été confectionnés pour l'évaluation de la cicatrisation et les essais de caractérisation respectivement. Une journée après les coulées, les spécimens ont été démoulés et mis en cure dans une eau saturée en chaux pendant 28 jours.

2.2 Conditions d'essai

2.2.1 Préfissuration

Les prismes ont été entaillés et puis préfissurés via un essai de flexion 3 points selon la norme EN 14651 à l'âge de 28 jours (Figure 1). La procédure de chargement et de déchargement, détaillée dans (Lauch & Charron & et al. 2022), permet d'obtenir des fissures d'ouverture résiduelle d'environ 0.2 à 0.3 mm en fond d'entaille, ce qui correspond aux limites d'ouvertures de fissure dans les codes canadiens CSA A23.3 et CSA S6 pour des structures exposées.

2.2.2 Conditions d'exposition

Après la préfissuration, 4 à 5 prismes par mélange ont été exposés dans chacune des conditions suivantes :

- 3 mois en immersion sous eau (eau saturée en chaux à $21 \pm 3^\circ\text{C}$) ;
- 3 mois en cycles de mouillage-séchage (3.5 jours sous eau saturée en chaux et 3.5 jours à l'air ambiant à $21 \pm 3^\circ\text{C}$ and $45 \pm 10\%$ d'humidité relative) ;
- 1 an en condition extérieure (climat de Montréal de mars 2019 à mars 2020, les températures ont varié de -22.1 à 33.1°C , les précipitations de pluie de 43.7 à 261.2 mm/mois et celles de neige au sol de 0 à 90 cm).

Pendant la cicatrisation, des observations visuelles et des mesures de perméabilité à l'eau ont été réalisées régulièrement pour mesurer le regain de cicatrisation (*RC*). À la fin de la période de cicatrisation, les prismes ont été rechargés jusqu'à rupture pour déterminer la reprise mécanique (*RM*). Enfin, quelques spécimens ont été découpés pour analyser les faciès des fissures au microscope électronique à balayage couplé avec une analyse par dispersion d'énergie (MEB-EDS) afin d'identifier les produits de cicatrisation. D'autres faciès de fissures ont aussi été observées à la loupe binoculaire. Ces quatre méthodes d'essai sont illustrées à la Figure 2 et sont décrites dans la section suivante.

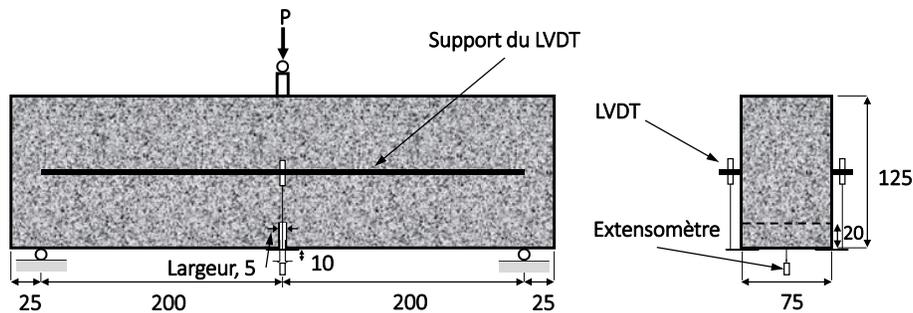


Figure 1. Essai de flexion 3 points sur prisme entaillé.

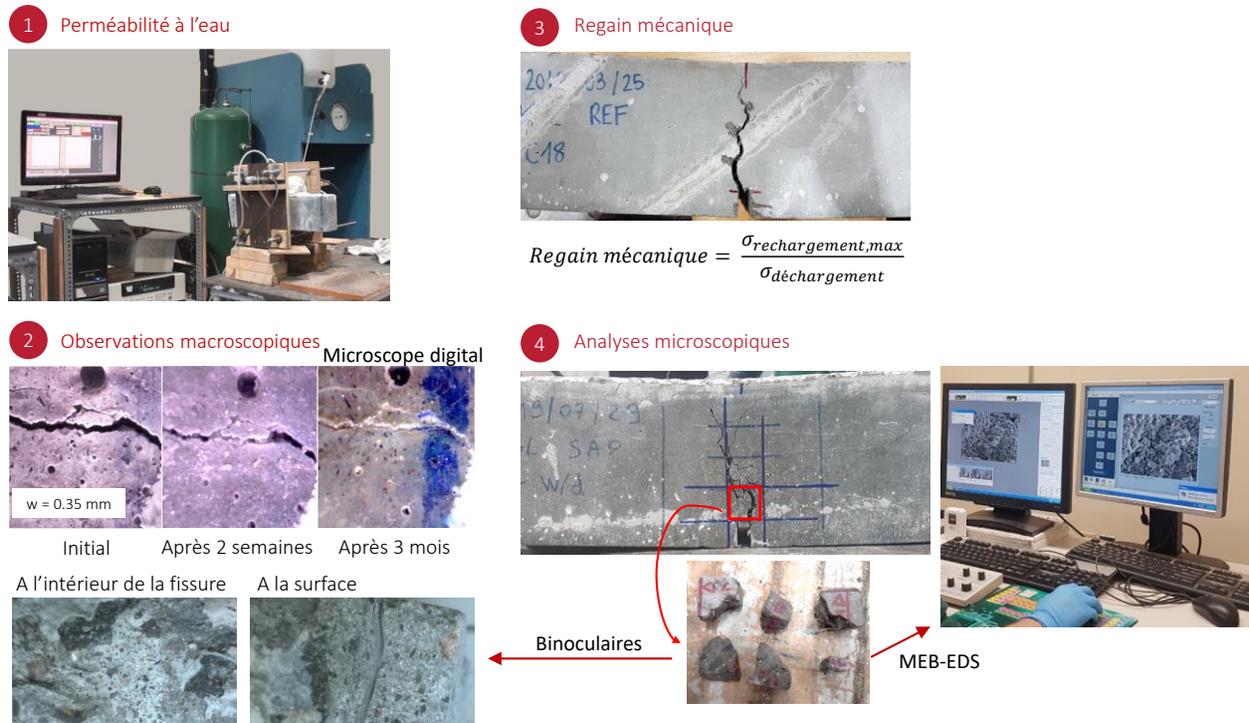


Figure 2. Quatre types de mesure pour évaluer la cicatrisation sur le même prisme.

2.3 Méthodes de caractérisation de l'autocicatrisation

2.3.1 Mesure de perméabilité à l'eau

Les mesures de perméabilité à l'eau ont été prises directement après la pré-fissuration (mesure initiale) et puis après 11 jours, 2 jours, 2 mois et 3 mois d'exposition en laboratoire, et après 3, 6, 9 et 12 mois d'exposition extérieure. Le dispositif de perméabilité à l'eau (Figure 2) a été précédemment développé et validé pour mesurer l'écoulement unidirectionnel à travers une fissure de flexion sous un gradient de pression de 30 kPa (Lauch et al. 2021). Le coefficient de perméabilité à l'eau K_w (m/s) est calculé par la loi de Darcy dans un régime permanent (Équation 1) avec Q (m³/s) le débit mesuré, A (m²) l'aire exposée à l'écoulement et $\Delta h/L$ le gradient de pression appliqué. Ensuite, l'indice qui détermine le degré de cicatrisation, le regain de cicatrisation (RC) est calculé en considérant le coefficient de perméabilité au temps t (K_{wt}) par rapport au coefficient de perméabilité initial (K_{wi}) via l'Équation 2. Plus d'informations sur les différents indices possibles pour évaluer la cicatrisation peuvent être trouvées dans (Lauch & Desmettre & et al. 2022).

$$K_w \text{ (m/s)} = \frac{Q L}{A \Delta h} \quad (1)$$

$$RC_t \text{ (\%)} = \left(1 - \frac{K_{wt}}{K_{wi}}\right) \cdot 100 \quad (2)$$

2.3.2 Reprise mécanique

À la fin de leur période de cicatrisation, les prismes sont rechargés jusqu'à la rupture (Figure 2) via le même essai de flexion 3 points. La procédure de rechargement est détaillée dans (Lauch & Charron & et al. 2022).

Les courbes typiques de préfissuration et de rechargement sont montrés à la Figure 3. L'indice de regain mécanique (RM) constitue le rapport entre la contrainte maximale au rechargement ($\sigma_{rechargement,max}$) et la contrainte avant rechargement lors de la préfissuration ($\sigma_{déchargement}$) tel qu'indiqué par l'Équation 3. Une discussion plus approfondie sur les différents indices de reprise mécanique utilisés dans la littérature et sur le choix de celui-ci peut être trouvée dans (Lauch & Charron & et al. 2022).

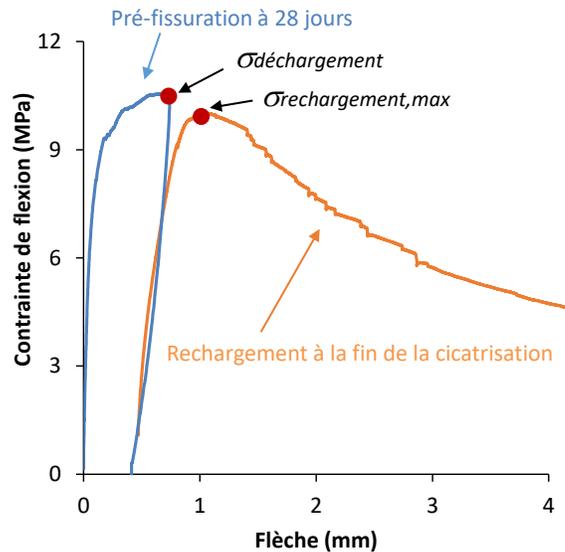


Figure 3. Préfissuration et rechargement à la rupture.

$$RM (\%) = \frac{\sigma_{rechargement,max}}{\sigma_{déchargement}} \cdot 100 \quad (3)$$

2.3.3 Observations macroscopiques

Des photos des fissures sur les faces latérales des prismes ont été prises avec un microscope digital immédiatement après la préfissuration et avant chaque mesure de perméabilité à l'eau pour observer visuellement l'évolution de la cicatrisation (Figure 2). Les ouvertures de fissure ont été mesurées à des points spécifiques le long de celle-ci. Bien qu'il est possible de déterminer la cicatrisation des fissures via un ratio de fermeture RF sur base des mesures d'ouvertures de fissure, il a été décidé de ne pas utiliser ce ratio, car il ne reflète pas la cicatrisation de l'ensemble de la fissure (mesures superficielles seulement) (Lauch et al. 2021). Par ailleurs, après le rechargement des prismes, quelques faciès de fissures ont été analysés à la loupe binoculaire pour avoir une idée de la distribution des produits de cicatrisation à l'intérieur de la fissure (Figure 2).

2.3.4 Analyses microscopiques (MEB-EDS)

Des analyses microscopiques au MEB-EDS ont été effectuées sur les faciès des fissures de morceaux prélevés dans les prismes après rechargement à la rupture (Figure 2). Ces analyses ont permis d'observer et d'identifier les produits de cicatrisation formés pour les différents mélanges de BRF et les différentes conditions d'exposition.

3. RÉSULTATS

Cet article présente un survol des résultats principaux concernant les impacts de la condition d'exposition (impact significatif) et des ajouts dans le BRF (impact de moindre importance) sur la cicatrisation. Les lecteurs sont invités à consulter (Lauch & Charron & et al. 2022; Lauch & Desmettre & et al. 2022) pour des analyses plus approfondies.

3.1 Perméabilité à l'eau

L'évolution du regain de cicatrisation *RC* est présentée à la Figure 4a, b et c, pour les prismes cicatrisés sous eau, en cycles de mouillage-séchage et à l'extérieur respectivement. Seuls les résultats pour les mélanges Contrôle, CSA et CA sont montrés ici, mais les tendances observées sont similaires aux autres mélanges. On observe un impact clair de la condition d'exposition sur la cinétique et la capacité de cicatrisation. Sous eau, la cicatrisation est très rapide au début, suivie d'un ralentissement drastique. En mouillage-séchage, on observe une cicatrisation plus graduelle. Et à l'extérieur, la cicatrisation est beaucoup plus lente et graduelle. En moyenne sur tous les mélanges, le *RC* final obtenu était de 84% sous eau, 93% en mouillage-séchage et 71% à l'extérieur. On note ainsi que les cycles de mouillage-séchage ont favorisé la cicatrisation par rapport à l'immersion sous eau, ce qui s'expliquerait par les périodes sèches permettant d'apporter plus de CO₂ et ainsi, de former des carbonates de calcium comme on le verra plus loin. En condition extérieure, la cicatrisation dépend du climat (Figure 4c). Pendant l'hiver, quand la température est inférieure à 0°C, un ralentissement de la cicatrisation peut être observé. Et au mois d'octobre 2019 pendant lequel un pic de précipitations a été relevé (261 mm), il semblerait que le phénomène ait été stimulé.

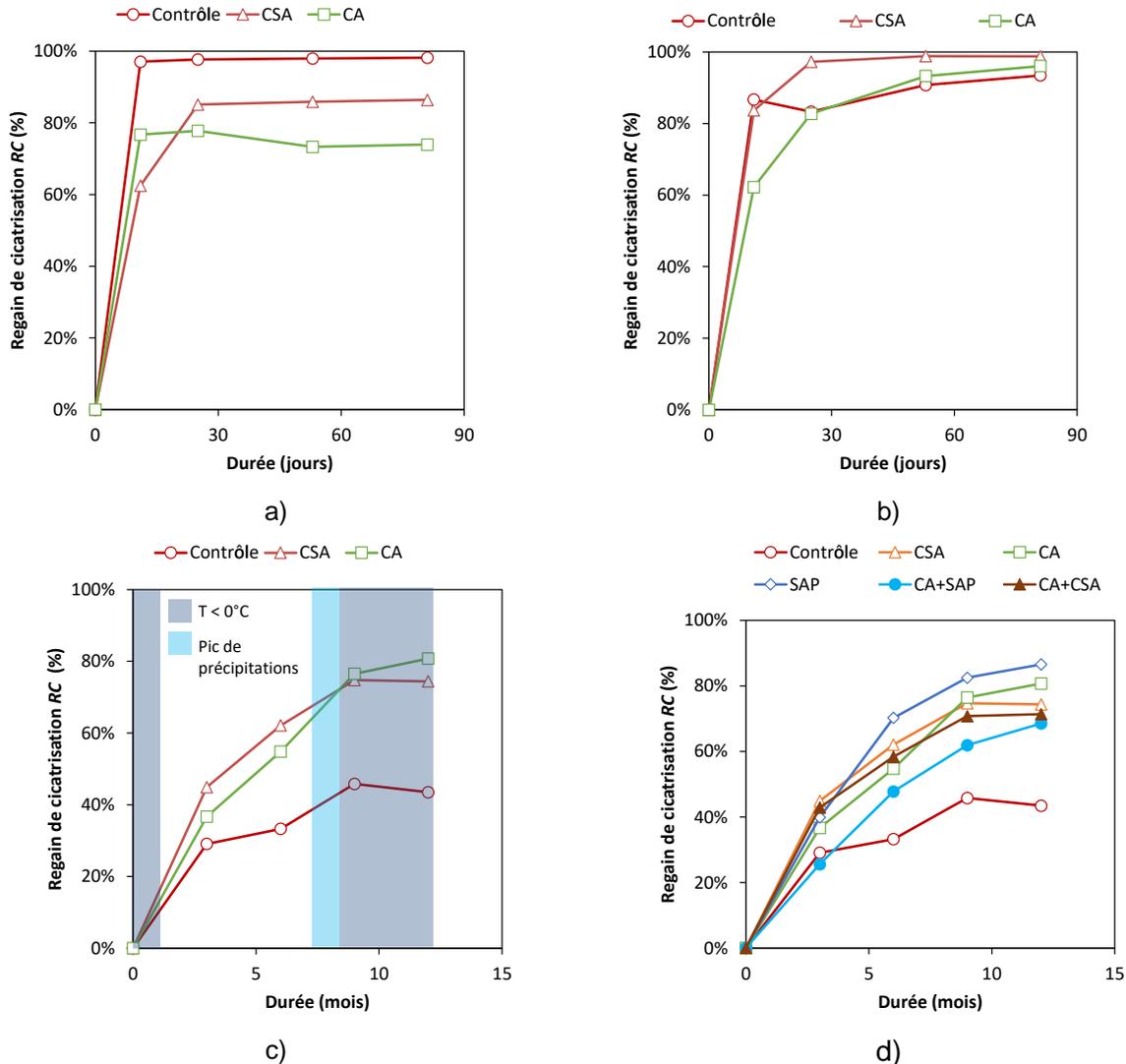


Figure 4. Évolution du regain de cicatrisation pour le Contrôle, CSA et SAP en a) immersion sous eau, b) cycles de mouillage-séchage et c) à l'extérieur et d) tous les mélanges en condition extérieure.

Contrairement à l'impact clair de la condition d'exposition sur la cicatrisation, l'effet des ajouts est moins net, sauf en condition extérieure tel que montré à la Figure 4d. On observe une influence bénéfique des ajouts, avec des regains de cicatrisation finaux de 69 à 87% par rapport au mélange de référence ($RC_f = 43\%$). Le mélange contenant le SAP se démarque avec les RC les plus élevés à partir de 6 mois.

3.2 Regain mécanique (mécanique) vs Regain de cicatrisation (perméabilité)

La Figure 5 reporte les résultats de regain mécanique (RM) obtenus après rechargement en flexion 3 points, en comparaison avec les regains de cicatrisation (RC) finaux, obtenus via les mesures de perméabilité à l'eau, pour tous les mélanges dans les trois conditions d'exposition (eau, mouillage-séchage et extérieur). On note que la performance au niveau durabilité n'est pas corrélée à celle au niveau mécanique. Un prisme avec une faible RC peut avoir un RM élevé, en particulier pour les prismes exposés à l'extérieur. Inversement, un prisme ayant beaucoup cicatrisé (RC élevé) n'implique pas forcément une reprise mécanique importante (RM faible). Ceci confirme la nécessité de réaliser des mesures de différents types pour obtenir un portrait précis de la capacité de cicatrisation qui peut être différente en durabilité et en mécanique.

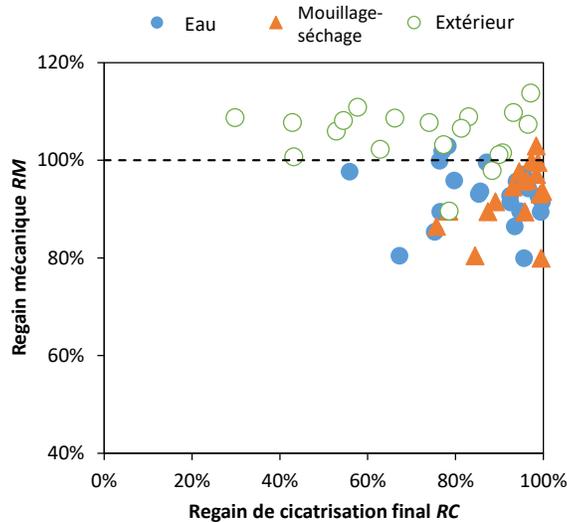


Figure 5. Regain mécanique (flexion) vs regain de cicatrisation (perméabilité) pour tous les mélanges.

3.3 Observations macroscopiques

La Figure 6 résume les observations principales notées au niveau macroscopique. En condition de cicatrisation en laboratoire (eau et mouillage-séchage), on remarque que les fissures se colmatent progressivement de dépôts blancs en surface, mais peu de produits de cicatrisation sont visibles si on observe un faciès de fissure à l'intérieur plus en profondeur. Au contraire, en conditions de cicatrisation à l'extérieur, on observe que la fissure s'est colmatée partiellement en profondeur, mais on ne voit pas de dépôts blancs en surface.

3.4 Observations microscopiques

La

Figure 7 présente la microstructure des différents produits de cicatrisation trouvés après cicatrisation sous eau, en cycles de mouillage-séchage et à l'extérieur. Ces images proviennent du mélange de référence (Contrôle), mais ces observations sont similaires à tous les autres mélanges. Sous eau, des aiguilles d'ettringite et des cristaux de calcite denses recouvrant toute la surface de la fissure sont identifiés. En mouillage-séchage, de la calcite et de la vatérite, un autre polymorphe de carbonate de calcium (CaCO_3), sont observés en une couche très dense recouvrant toute la surface. En condition extérieure, on retrouve des petits et larges cristaux de calcite, mais qui ne recouvrent pas toute la surface.

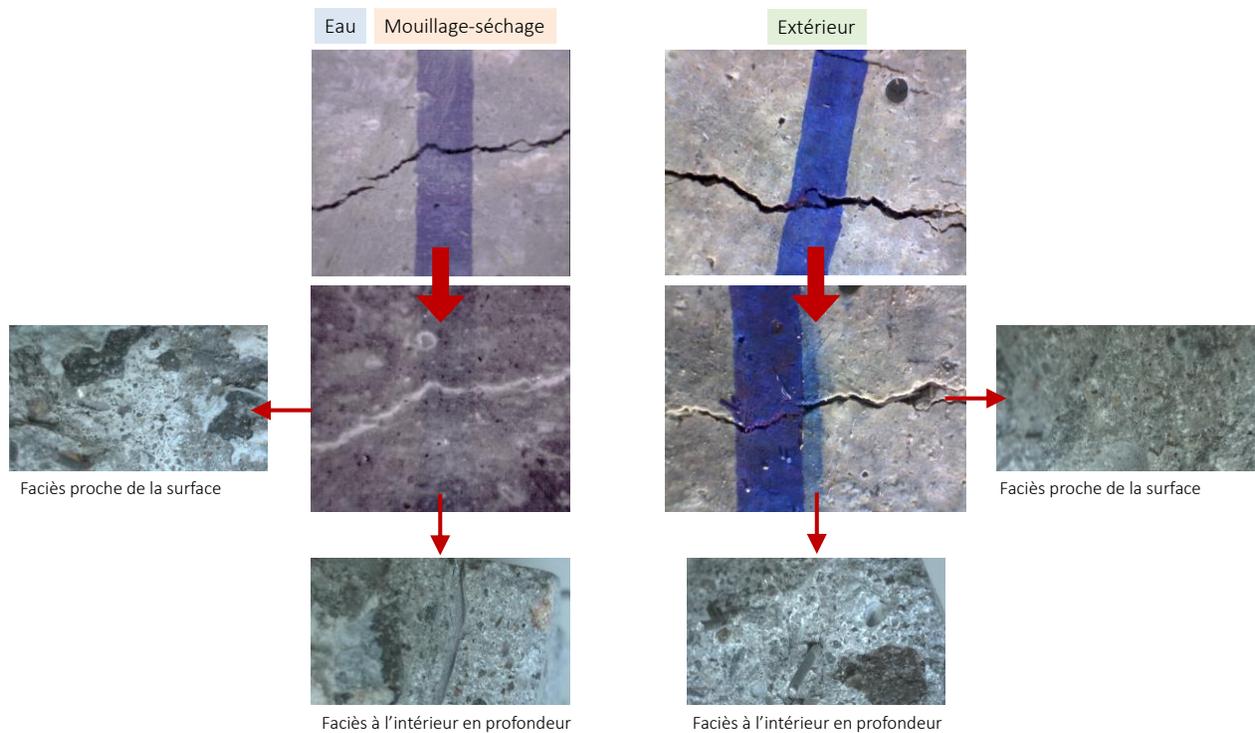


Figure 6. Observations macroscopiques des fissures en surface et des faciès proches de la surface et à l'intérieur en profondeur.

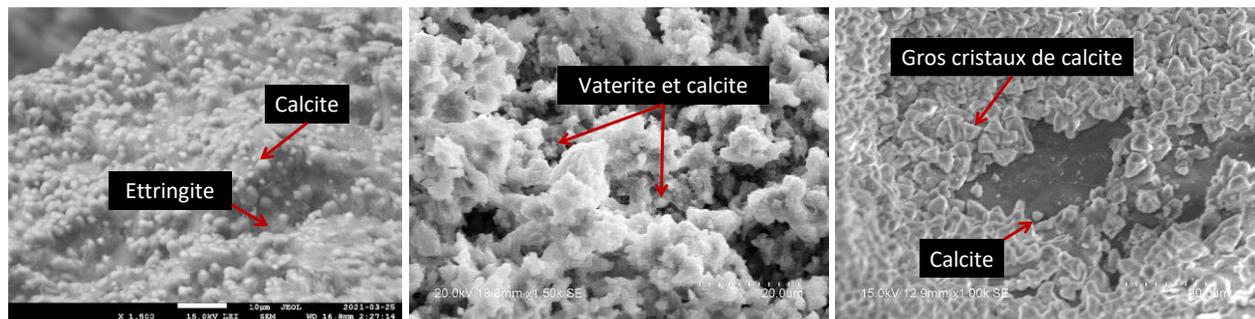


Figure 7. Analyses microscopiques des produits de cicatrisation trouvés après a) immersion sous eau, b) cycles de mouillage-séchage et c) condition extérieure.

4. DISCUSSION

4.1 Influence des ajouts intégrés dans les BRF sur la cicatrisation

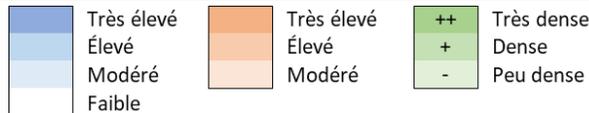
Le

Tableau 2 présente le classement des 6 mélanges de béton selon leurs performances au niveau de la perméabilité (regain de cicatrisation *RC*), du regain mécanique (*RM*) et des observations micro- et macroscopiques, selon les différentes conditions d'exposition. Le mélange ayant le mieux performé n'est pas simple à trouver étant donné l'influence marquée de la condition d'exposition et des résultats assez similaires entre les mélanges dans chaque condition. De manière générale, on remarque l'effet bénéfique des ajouts surtout en condition extérieure en termes de *RC*. Si on considère plusieurs critères au niveau de la perméabilité (cicatrisation initiale rapide, capacité de cicatrisation élevée, potentiel de cicatrisation ultérieure)

et du regain mécanique (bonne résistance en flexion initiale, regain mécanique élevé, grande capacité de déformation à la rupture), qui sont détaillés dans (Lauch 2021), ainsi que l'importance d'une bonne performance en condition réelle extérieure, le mélange contenant le SAP est considéré comme le meilleur candidat à la cicatrization des fissures. La particularité du SAP est qu'il permet d'absorber de l'eau dans les périodes humides et la relâcher dans les périodes plus sèches. Ainsi, c'est le mélange qui est le plus versatile. Dans tous les cas, les combinaisons d'ajouts CA+CSA et CA+SAP n'ont pas montré les synergies souhaitées.

Tableau 2. Synthèse du classement des mélanges de béton selon leurs performances

	Perméabilité Regain de cicatrization RC_f		Mécanique Regain mécanique RM		Analyses microscopiques Densité		Type	Observations macroscopiques
Eau	Control	98%	CA+CSA	97%	Control	+	Ettringite et calcite	Produits de cicatrization recouvrant les surfaces externes de la fissure, peu en profondeur
	CSA	86%	SAP	97%	CSA	+		
	SAP	85%	CA+SAP	96%	SAP	+		
	CA+SAP	83%	CA	94%	CA+SAP	+		
	CA+CSA	77%	CSA	93%	CA	+		
	CA	74%	Control	92%	CA+CSA	-		
	Moyenne	84%	Moyenne	95%	Moyenne	+		
Mouillage-séchage	CA+CSA	99%	SAP	101%	CA+CSA	++	Calcite et vatérite	
	CSA	99%	CA	101%	CSA	++		
	CA	96%	CA+SAP	101%	Contrôle	++		
	Contrôle	93%	CA+CSA	99%	SAP	++		
	SAP	91%	Contrôle	98%	CA	+		
	CA+SAP	80%	CSA	95%	CA+SAP	+		
	Moyenne	93%	Moyenne	99%	Moyenne	++		
Extérieur	SAP	87%	CA	110%	SAP	+	Calcite (cristaux plus larges)	Produits de cicatrization recouvrant moins les surfaces externes, mais plus présents en profondeur
	CA	81%	Contrôle	110%	CA	+		
	CSA	74%	SAP	106%	CA+CSA	+		
	CA+CSA	71%	CA+SAP	105%	CA+SAP	+		
	CA+SAP	69%	CSA	105%	Contrôle	+		
	Contrôle	43%	CA+CSA	100%	CSA	-		
	Moyenne	71%	Moyenne	106%	Moyenne	+		



4.2 Impact significatif de la condition d'exposition sur la cicatrization

Afin d'expliquer les différentes performances de cicatrization sous diverses expositions au niveau durabilité (perméabilité à l'eau) et au niveau mécanique (flexion), il importe de les mettre en relation avec les observations microstructurales, synthétisées au Tableau 2. Lorsque l'on analyse les résultats des quatre types de mesures au Tableau 2, on remarque l'influence significative de la microstructure des produits de cicatrization sur ces propriétés. La Figure 8 illustre et synthétise ces observations. Avec une exposition sous l'eau, les produits de cicatrization dense (ettringite et calcite) recouvrant toute la surface explique le regain de cicatrization élevé, tandis que la présence d'aiguilles d'ettringite, moins résistant mécaniquement

(Scholtzová et al. 2015; Sevcik et al. 2018), explique le regain mécanique plus faible. En mouillage-séchage, les produits de cicatrisation sont très denses (calcite et vatérite), ce qui amène un RC le plus élevé, et comme la vatérite est plus solide que l'ettringite, cela contribue au RM le plus élevé obtenu. Finalement, en condition extérieure, les produits de cicatrisation sont moins visibles en surface de la fissure, ce qui engendre un RC plus faible, mais, comme le phénomène de cicatrisation s'est produit plus lentement, plus de réactifs ont pu pénétrer à l'intérieur de la fissure en profondeur, tel qu'observé précédemment par (Argouges & Gagné 2009). Ainsi, la présence de larges cristaux de calcite distribués en profondeur de la fissure contribue au RM le plus élevé observé.

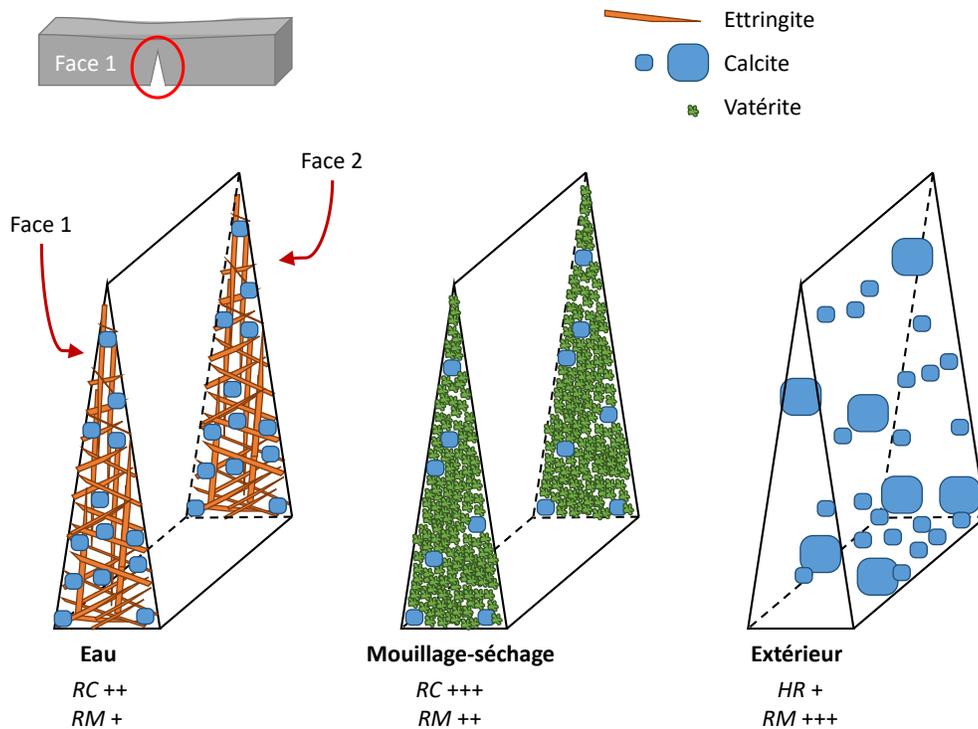


Figure 8. Influence de la microstructure des produits de cicatrisation dans les fissures sur les performances observées (*RC* et *RM*) dans l'eau, en mouillage-séchage et à l'extérieur.

5. CONCLUSIONS

Ce projet de recherche visait à évaluer de manière détaillée l'autocicatrisation du béton contenant différents ajouts (ajout cristallin CA, agent expansif CSA, polymère superabsorbant SAP) et exposés dans différentes conditions de laboratoire (immersion sous eau, cycles de mouillage-séchage) ainsi qu'en condition réelle extérieure (climat canadien). Les mesures de perméabilité à l'eau, de regain mécanique, les observations macro- et microscopiques ont été réalisées sur les mêmes prismes, et donc les mêmes fissures, permettant ainsi une corrélation directe entre un état de cicatrisation et une reprise mécanique. Basé sur les résultats expérimentaux présentés, les conclusions principales tirées sont les suivantes :

- La cicatrisation se produit dans un climat hivernal canadien, mais à un rythme plus lent qu'en conditions de laboratoire. Le climat humide de Montréal favorise la cicatrisation, tandis que le froid freine le processus pendant l'hiver.
- Les performances de durabilité (perméabilité, regain de cicatrisation *RC*) et mécanique (regain mécanique *RM*) ne sont pas corrélées. Un prisme avec un *RC* élevé ne présente pas nécessairement un *RM* élevé. Ces différences s'expliquent par la microstructure (types, densité et distribution) des produits de cicatrisation formés dans les différentes conditions d'exposition.

- En conditions de laboratoire, les produits de cicatrisation se sont formés très rapidement aux surfaces extérieures de la fissure, limitant la pénétration des réactifs plus en profondeur. Cela explique les *RC* élevés et des *RM* modérés.
- En condition réelle extérieure, la cicatrisation s'est produite plus lentement, permettant aux réactifs de former des produits de cicatrisation à l'intérieur en profondeur de la fissure. Cela explique les *RC* plus faibles mais des *RM* élevés.
- L'influence des ajouts intégrés au BRF est mineure par rapport à l'impact de la condition d'exposition sur la cicatrisation des fissures. Néanmoins, le mélange contenant le SAP serait celui avec le meilleur potentiel de cicatrisation tant du point de vue durabilité que mécanique.

En conclusion, cette étude a confirmé la capacité d'autocicatrisation de fissures de béton en condition réelle (1 an dans un climat canadien). Dans tous les cas, le choix de la technique de cicatrisation doit se faire en considérant l'application visée.

6. REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche a été soutenu financièrement par la subvention du Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada (CRSNG) accordée au prof. J.-P. Charron et par la bourse doctorale du Fonds de Recherche en Nature et Technologique du Québec (FRQNT) décernée à K.-S. Lauch. Les auteurs remercient également les dons matériels de Holcim, Euclid, Bekaert, Penetron, Denka et BASF.

7. REFERENCES

- Argouges, M., & Gagné, R. (2009). *Étude des mécanismes et de la cinétique de l'autocicatrisation dans des mortiers cimentaires fissurés*. 10e édition des Journées Scientifiques du Regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton (RF)2B, Cachan (France).
- Ferrara, L., Van Mullem, T., Cruz Alonso, M., Antonaci, P., Paul Borg, R., Cuenca, E., (...) De Belie, N. (2018). Experimental characterization of the self-healing capacity of cement based materials and its effects on the material performance: A state of the art report by COST Action SARCOS WG2. *Construction and Building Materials*, 167, 115-142.
- Lauch, K.-S. (2021). *Self-healing of fibre reinforced concretes containing various admixtures under laboratory and outdoor conditions*. (Thèse de doctorat, Polytechnique Montréal).
- Lauch, K.-S., Desmettre, C., & Charron, J.-P. (2021). New water permeability set-up and factors affecting concrete self-healing. *Construction and Building Materials*, 294, 123595.
- Lauch, K. S., Charron, J. P., & Desmettre, C. (2022). Comprehensive evaluation of self-healing of concrete with different admixtures under laboratory and long-term outdoor expositions. *Journal of Building Engineering*, 104661.
- Lauch, K. S., Desmettre, C., & Charron, J. P. (2022). Self-healing of concrete containing different admixtures under laboratory and long-term real outdoor expositions based on water permeability test. *Construction and Building Materials*, 324, 126700.
- Li, V., & Herbert, E. (2012). Robust self-healing concrete for sustainable infrastructure. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 10, 207-218.
- Ministère des Transports du Québec. (2019). *Etat général*.
- Roig-Flores, M., Moscato, S., Serna, P., & Ferrara, L. (2015). Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments. *Construction and Building Materials*, 86, 1-11.
- Scholtzová, E., Tunega, D., & Speziale, S. (2015). Mechanical properties of ettringite and thaumasite—DFT and experimental study. *Cement and Concrete Research*, 77, 9-15.
- Sevcik, R., Sasek, P., & Viani, A. (2018). Physical and nanomechanical properties of the synthetic anhydrous crystalline CaCO₃ polymorphs: vaterite, aragonite and calcite. *Journal of Materials Science*, 53(6), 4022-4033. doi:10.1007/s10853-017-1884-x
- Sisomphon, K., Copuroglu, O., & Koenders, E. A. B. (2013). Effect of exposure conditions on self healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating various cementitious materials. *Construction and Building Materials*, 42, 217-224.