

ÉTUDE DES MÉCANISMES ET DE LA CINÉTIQUE DE L'AUTOCICATRISATION DANS DES MORTIERS CIMENTAIRES FISSURÉS

Matthieu Argouges et Richard Gagné

Centre de recherche sur les infrastructures en béton (CRIB)
Université de Sherbrooke, Québec, Canada

RÉSUMÉ : L'étude vise à mieux comprendre l'influence du rapport E/C et de l'ouverture de la fissure sur la cinétique et les mécanismes à l'origine de la formation des produits de cicatrisation dans le volume d'une fissure. Trois types de mortiers ($E/C = 0,35, 0,45$ et $0,60$) ont été soumis à une fissuration contrôlée à 28 jours à l'aide d'un cœur expansif. Pour chaque type de mortier, trois catégories de fissures ont été créées ($50 \pm 15 \mu\text{m}$, $100 \pm 10 \mu\text{m}$, $220 \pm 35 \mu\text{m}$). La cinétique de l'autocicatrisation est évaluée à l'aide d'une cellule de perméabilité qui permet de mesurer l'évolution, au cours du temps (1, 3 et 5 mois de conservation à 23°C et 100% H.R.), du débit d'air dans le volume d'une seule fissure. L'autocicatrisation a été quantifiée par ses effets sur les débits relatifs et les ouvertures apparentes relatives exprimés en pourcentage des valeurs initiales mesurées immédiatement après la fissuration. Les ouvertures et les débits relatifs baissent très rapidement durant le premier mois, mais la baisse subséquente (entre 1 et 5 mois) est beaucoup plus faible. Le taux de formation des produits d'hydratation ($\mu\text{m}/\text{mois}$) durant le premier mois de conservation varie peu en fonction du rapport E/C et de l'ouverture initiale de la fissure. Ces résultats suggèrent que dans des fissures relativement jeunes, la cinétique et les mécanismes d'autocicatrisation (volume total des produits de cicatrisation) sont relativement peu influencés par la composition physico-chimique de la pâte ou par l'ouverture initiale de la fissure. Le rapport E/C et le degré d'hydratation avant la fissuration ne sont pas des paramètres majeurs de la cinétique d'autocicatrisation des mortiers de cette étude. La cinétique d'autocicatrisation est influencée par l'ouverture initiale d'une fissure. Dans le cas des petites fissures ($< 100 \mu\text{m}$), l'autocicatrisation est importante durant le premier mois, puis la baisse est beaucoup plus lente pendant les 4 mois suivants. Par la suite, ce phénomène se poursuit mais beaucoup plus lentement, probablement en raison de l'obstruction importante de la fissure qui limite l'apport d'humidité et du CO_2 nécessaires pour la poursuite des réactions. Dans le cas des grandes fissures ($> 190 \mu\text{m}$), l'autocicatrisation est plus progressive car le volume à combler est plus grand. Même après un mois, la fissure est encore relativement peu obstruée. L'humidité et le CO_2 sont donc toujours disponibles en grande quantité pour la poursuite des réactions d'hydratation et de carbonatation.

1. INTRODUCTION

Le Canada, et plus particulièrement le Québec, fait face à de très importants défis reliés à l'état des infrastructures de transports pour trois raisons majeures : 1) Ces structures sont exposées à des conditions climatiques très rigoureuses (cycle de gel/dégel, utilisation intensive de sels déglçants); 2) Les charges routières actuelles sont beaucoup plus importantes (en nombre et en poids) que les charges prévues lors de la conception; 3) La majorité de ces structures est âgée de 40 à 60 ans et a atteint la durée de vie utile. Des ressources très importantes doivent actuellement être consacrées à l'entretien, la réparation et la reconstruction de ces infrastructures de transport. Pour optimiser la gestion de ces structures, il est important de disposer d'outils et de modèles numériques permettant de prédire la durée de vie des structures en service. La fissuration est un paramètre clé de la durabilité des structures en béton armé. Or le couplage entre la fissuration et la durabilité est complexe, notamment parce que les fissures peuvent être évolutives. Leur localisation et leur géométrie (ouverture de fissure) peuvent varier sous l'effet des sollicitations

internes (réaction alcali-granulat) ou externes (charges mécaniques, cycles thermiques). Les mécanismes d'autocicatrisation peuvent aussi contribuer à faire évoluer les propriétés géométriques et les mécanismes de transport dans les fissures.

Les approches de prise en compte de la fissuration sur la cinétique de dégradation des structures en béton et sur la prédiction de la durée de vie des structures en béton sont encore relativement peu développées. Cette absence d'outils fiables et efficaces découle notamment d'une mauvaise compréhension des mécanismes et de la cinétique d'autocicatrisation des fissures dans les matrices cimentaires.

Selon Sukhotskaya (1983), l'autocicatrisation d'un béton peut se définir par le recouvrement partiel ou complet de la solidité originale d'un béton placé dans un environnement favorable (température et humidité) après un chargement sans ruine (tel que le gel/dégel) qui cause de la microfissuration. Deux mécanismes sont principalement à l'origine de l'autocicatrisation des matrices cimentaires (Ismail, 2006) : 1) L'hydratation du ciment anhydre résiduel et 2) La carbonatation.

La fissuration du béton peut exposer ou réactiver des grains de ciment partiellement hydratés, qui, au contact de l'eau transportée dans la fissure, peuvent former les produits d'hydratation dans ou à proximité du plan de fissuration. La fissuration, selon son ouverture et de son état de saturation, peut aussi favoriser le transport du CO_2 gazeux ou de l'acide carbonique en solution. Ces produits peuvent ensuite engendrer une réaction de carbonatation de la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) qui produit des cristaux de calcite (CaCO_3) sur les parois de la fissure (Edvardsen, 1999). Ces deux mécanismes contribuent progressivement au remplissage du volume de la fissure par précipitation de composés stables dans la phase liquide ou par déposition topochemique sur les parois de la fissure. Sous certaines conditions, ces mécanismes peuvent conduire à une cicatrisation pratiquement complète de la fissure (Jacobsen, 1996). L'ouverture initiale de la fissure semble être un paramètre clé gouvernant à la fois les mécanismes et la cinétique de l'autocicatrisation (Ismail, 2006; Ismail et al., 2007; Reinhardt, 2003). Il n'existe que très peu d'études systématiques sur l'influence des paramètres de composition des matrices cimentaires, de l'âge à la fissuration et de l'ouverture des fissures sur les mécanismes et la cinétique de l'autocicatrisation.

2. BUT DE LA RECHERCHE

Cette étude a pour objectif de mieux comprendre les mécanismes et la cinétique de l'autocicatrisation dans des matrices de mortier cimentaire. Elle vise plus particulièrement à comprendre l'influence du rapport E/C, du degré d'hydratation au moment de la fissuration (28 jours) et de l'ouverture de la fissure sur la cinétique et les mécanismes à l'origine de la formation des hydrates secondaires dans le volume d'une fissure. Trois types de mortiers (E/C = 0,35, 0,45 et 0,60) ont été soumis à une fissuration contrôlée à 28 jours (sous chargement soutenu) à l'aide d'un cœur expansif. Pour chaque type de mortier, trois catégories de fissures ont été créées ($50 \pm 15 \mu\text{m}$, $100 \pm 10 \mu\text{m}$, $220 \pm 35 \mu\text{m}$). La cinétique de l'autocicatrisation est évaluée à l'aide d'une cellule de perméabilité qui permet de mesurer l'évolution, au cours du temps (1, 3 et 5 mois de conservation à 23°C et 100% H.R.), du débit d'air dans le volume de la fissure. Cette approche permet d'estimer l'évolution de l'ouverture apparente de la fissure en fonction du temps

de conservation à 100% H.R. À la fin des essais, les surfaces internes des fissures seront observées à l'aide d'un MEB à pression variable pour analyser les produits d'hydratation à l'origine de l'autocicatrisation. Les résultats permettront notamment de déterminer, pour chaque catégorie d'ouverture de fissure, la relation entre le potentiel d'autocicatrisation et le degré d'hydratation au moment de la fissuration. La Figure 1 présente les principales étapes et les principaux paramètres du programme expérimental. Cette recherche s'inscrit dans une thématique plus large ayant pour objectif de développer des matériaux cimentaires possédant un fort potentiel d'autocicatrisation.

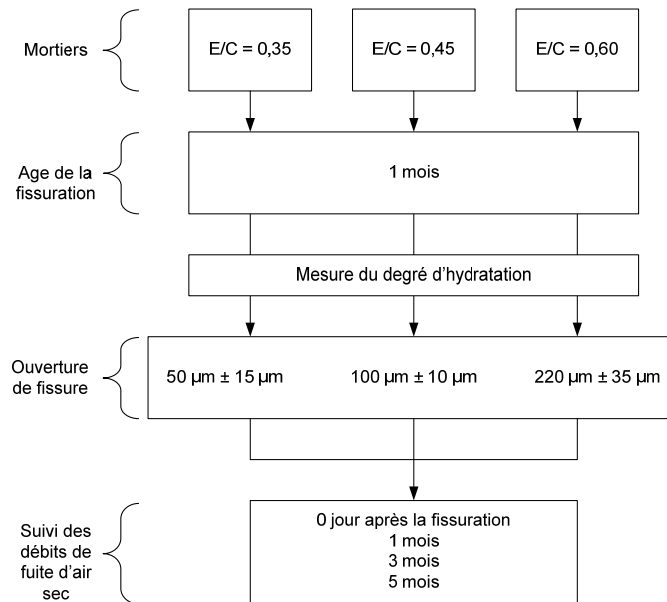


Figure 1. Schéma de la structure du programme expérimental

3. PROGRAMME EXPÉRIMENTAL

3.1 Matériaux et mortiers

Toutes les éprouvettes de mortiers ont été fabriquées avec un ciment Portland canadien pur de type GU. Les teneurs en C_3S , C_2S , C_3A et C_4AF (Bogue) sont respectivement de 54%, 18%, 7% et 8%. La finesse Blaine est de 392 m^2/kg . Tous les mortiers ont été produits avec un sable de rivière siliceux ayant un module de finesse de 2,61. Les mortiers ayant un rapport E/L de 0,35 ont été produits avec un superplastifiant type polynaphtalène sulfonate. La quantité de superplastifiant a été ajustée pour produire une maniabilité (étalement à la table à chocs) similaire à celui des mortiers de rapport E/C de 0,45. Pour chaque rapport E/C, deux gâchées de 10 kg ont été produites dans un malaxeur à mortier d'une capacité de 10 litres. Dans le cadre de cette étude, 18 éprouvettes ont été produites (6 éprouvettes pour chaque rapport E/C) mais seulement 9 ont été utilisées pour le programme expérimental. Le Tableau 1 présente les caractéristiques de formulation et les résistances à la compression à 28 jours des trois types de mortiers étudiés.

Tableau 1. Formulation et résistance à la compression des mortiers

E/C	0,35	0,45	0,60
Ciment (g)	2800	2500	2134
Sable (g)	6220	6375	6586
Eau (g)	980	1125	1280
Superplastifiant (g)	43	0	0
Résistance à la compression à 28 jours (MPa)	62	51	37

3.2 Éprouvettes

Les éprouvettes de mortiers sont de formes cylindriques, avec une ouverture au centre pour permettre l'insertion du mécanisme de fissuration contrôlée : le cœur expansif (Figure 2). Toutes les éprouvettes de mortier sont renforcées d'un anneau en acier ayant une section circulaire de 4,8 mm de diamètre et un diamètre intérieur de 95,2 mm (Figure 2). Cet anneau joue le rôle d'armature interne pour simuler le comportement en traction d'un composite de béton armé. Il permet notamment de préserver la cohésion globale après la fissuration de l'éprouvette.

Les moules cylindriques, comportant une insertion cylindrique de *Teflon* en leur centre, ont été remplis en deux couches en utilisant une légère vibration après la mise en place de chacune des couches. La surface supérieure de l'éprouvette est ensuite arasée et le moule est recouvert d'une plaque de plastique rigide et imperméable pendant approximativement 24 heures. Immédiatement après le démoulage, les éprouvettes sont conservées dans une chambre humide (brouillard) maintenue à 23 °C et 100 % d'humidité relative. Avant de débiter la fissuration, la face supérieure de l'éprouvette (soumise à l'arasement du béton frais) a été polie ou, si nécessaire, rectifiée par un usinage de précision à l'aide d'une meule diamantée montée sur tour industriel.

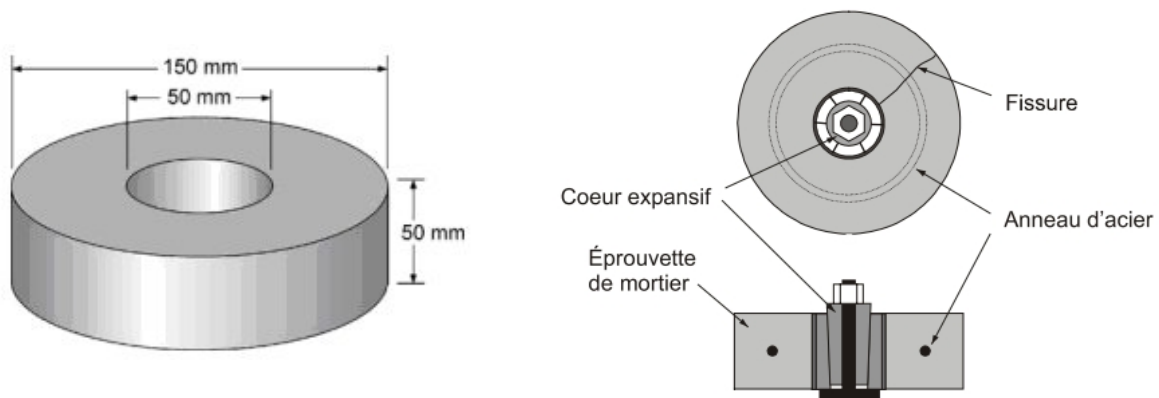


Figure 2. Schéma des éprouvettes et du cœur expansif

3.3 Méthodes d'essais

3.3.1 Fissuration

Les éprouvettes de mortiers ont été fissurées par l'application d'une déformation contrôlée en traction engendrée par le cœur expansif (Figure 2). Le cœur expansif est constitué d'un cône tronqué en acier qui glisse à l'intérieur de six pétales coniques en acier (Gagné et al., 2001). Une mince bague en PVC retient l'ensemble des pétales contre le cône interne et joue le rôle de coussin déformable entre le cœur expansif et la surface interne des éprouvettes de mortier. La fissuration contrôlée est engendrée par le serrage d'un boulon et d'un écrou en acier haute résistance qui force la pénétration du cône à l'intérieur des pétales. Ce processus entraîne une augmentation du diamètre de la bague en PVC, ce qui conduit à une déformation du diamètre interne de l'éprouvette de mortier. La fissuration contrôlée (ouverture de la fissure) est obtenue en ajustant la déformation du cœur expansif.

Pour chaque rapport E/C, trois catégories de fissures ont été créées (Fine: $50 \pm 15 \mu\text{m}$, Moyenne: $100 \pm 10 \mu\text{m}$, Grosse: $220 \pm 35 \mu\text{m}$) 28 jours après la fabrication des éprouvettes. L'ouverture initiale d'une fissure a été mesurée avec un vidéo-microscope offrant des outils graphiques pour effectuer des mesures géométriques (longueur, surfaces, etc.) à partir d'images vidéo à très haute résolution. L'ouverture d'une fissure est la moyenne de 10 mesures réparties sur les faces supérieure et inférieure de l'éprouvette. Seules les fissures dont l'écart entre l'ouverture moyenne des faces supérieure et inférieure était inférieur à 30% ont été retenues pour cette étude. La Figure 3 présente l'aspect visuel typique des trois catégories de fissures (fine, moyenne et grosse). Les photos de la Figure 3 montrent que les lèvres des fissures sont toujours suffisamment nettes pour pouvoir effectuer une mesure précise de leur ouverture locale.

Lors de la fissuration avec le cœur expansif, plusieurs fissures peuvent se former dans une même éprouvette. Dans ce cas, une feuille d'aluminium autocollante est appliquée sur la face supérieure de l'éprouvette. Cette pellicule imperméable est préalablement découpée pour créer une mince ouverture directement au droit de la fissure que l'on souhaite étudier. Cette technique permet de forcer l'écoulement d'air au travers d'une seule fissure.

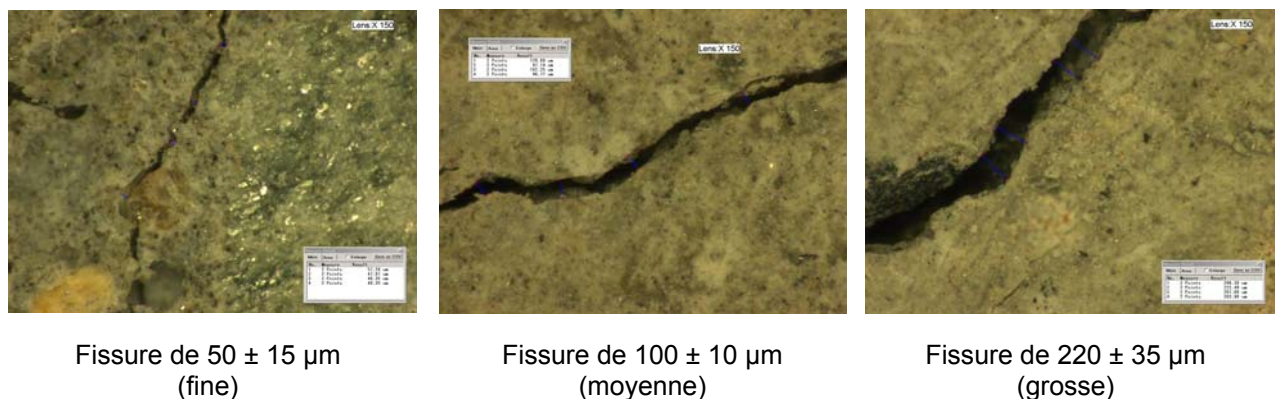


Figure 3. Aspect visuel typique de trois catégories de fissures au moment de la fissuration initiale à 28 jours (E/C = 0,35), grossissement X150

3.3.2 Mesure des débits gazeux

L'évolution de l'autocicatrisation, et de ses effets sur les propriétés de transport dans une fissure, a été quantifiée à l'aide d'une cellule de perméabilité à l'air. Cette cellule est spécifiquement conçue pour être utilisée avec une éprouvette de mortier sollicitée par le cœur expansif (Figure 4). Elle permet des mesures précises du débit d'air à travers une fissure unique sous des conditions d'écoulement bien contrôlées (température et gradient de pression constants). Les pressions absolues en amont et en aval sont maintenues constantes à 150 kPa et à 100 kPa $\pm$ 5 kPa (pression atmosphérique) respectivement. Le débit volumique (litre/minute) en aval est mesuré par un des trois débitmètres à bille (rotamètre) comportant chacun une plage de mesure spécifique.

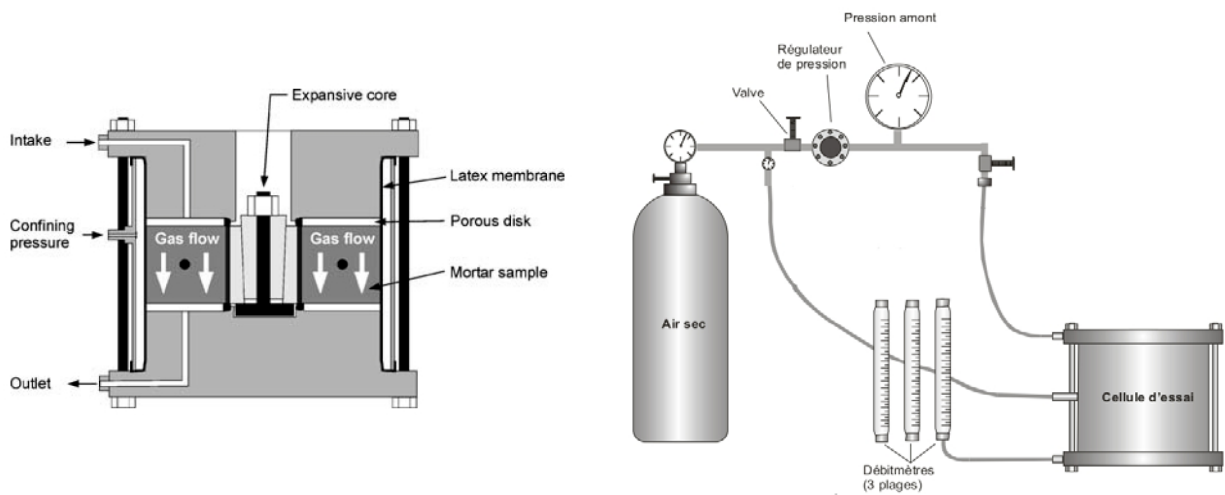


Figure 4. Schéma de la cellule de perméabilité et du dispositif de mesure du débit

Pour chaque taille de fissure et pour chaque rapport E/C, les débits d'air sec ont été mesurés immédiatement après la fissuration initiale (28 jours) et après 1, 3 et 5 mois de conservation en chambre humide après la fissuration initiale. Les éprouvettes ont été soumises à un séchage de 24h à 35°C avant chaque mesure du débit. Ce traitement facilite l'évaporation de l'eau dans la fissure et diminue les risques de contamination de la cellule de perméabilité et des débitmètres.

3.3.3 Degré d'hydratation

Le degré d'hydratation des mortiers a été mesuré pour pouvoir étudier la relation entre le potentiel d'autocicatrisation et la quantité de ciment anhydre au moment de la fissuration. La mesure du degré d'hydratation a été réalisée à partir de fragments de mortier prélevés dans des cubes de mortier selon la procédure utilisée par Popic (Popic, 2010). Cette procédure est basée sur la différence entre la masse d'un échantillon séché à 100°C et celle du même échantillon séché à 1000 °C. Le calcul du degré d'hydratation prend notamment en compte les pertes au feu du ciment et du sable.

4. RÉSULTATS

4.1 Fissuration

Le Tableau 2 présente l'ouverture moyenne des fissures créées à l'aide du cœur expansif. Pour certaines conditions (rapport E/C, catégorie de fissure), plusieurs fissures ont été créées et plusieurs éprouvettes ont dû être éliminées afin de pouvoir créer une fissure homogène (ouverture constante entre la face supérieure et la face inférieure) et ayant une ouverture comprise dans la plage recherchée.

Tableau 2. Ouverture des fissures	
Mortier	Ouverture moyenne (µm)
E/C = 0,35	190
	105
	64
E/C = 0,45	196
	93
	45
E/C = 0,60	254
	98
	41

4.2 Relation entre le débit et l'ouverture de fissure

La Figure 5 présente la relation entre l'ouverture d'une fissure (W) et le débit d'air (Q), pour un gradient de pression constant de 50 kPa. Plus l'ouverture de la fissure est importante, plus le débit est élevé. Lorsque l'ouverture de la fissure passe de 50 µm à 250 µm (x 5), le débit augmente d'un ordre de grandeur. On constate que le rapport E/C du mortier ne semble pas avoir d'effet significatif sur la relation entre le débit et l'ouverture de la fissure.

Les résultats de la Figure 5 démontrent qu'il existe une relation polynomiale de degré 3 entre le débit et l'ouverture initiale de la fissure ($Q = f(w^3)$). Ce type de relation est compatible avec le modèle d'écoulement proposé par Ismail (Ismail, 2006).

La courbe de la Figure 5 sera plus tard utilisée pour estimer l'ouverture apparente d'une fissure en cours de cicatrisation. À partir d'un débit mesuré expérimentalement (Q), on peut calculer l'ouverture apparente (Wa) à l'aide de l'Équation 1. Cette équation n'est valable que pour les conditions spécifiques de nos essais (longueur de fissure = 50 mm, largeur de fissure = 50 mm, gradient de pression de 50 KPa).

$$Q = -2 \cdot 10^{-7} \times Wa^3 + 0,0003 \times Wa^2 + 0,0008 \times Wa \quad (1)$$

Avec :

Q : Débit mesuré expérimentalement (litre/minute)

Wa : Ouverture apparente (μm)

L'ouverture apparente est une estimation indirecte de l'ouverture réelle d'une fissure en cours d'autocicatrisation. Cette grandeur est cependant très utile car il n'est généralement pas possible de mesurer l'ouverture réelle d'une fissure en cours d'autocicatrisation. En effet, durant la conservation en chambre humide, après la fissuration initiale, la formation d'hydrates secondaires et la carbonatation dans la fissure et sur les faces externes des éprouvettes rendent pratiquement impossible la localisation précise des lèvres des fissures. La Figure 6 montre l'aspect visuel de la même région d'une fissure de $64 \mu\text{m}$ dans le mortier avec un E/C de 0,35. Il est très facile de localiser et mesurer l'ouverture de la fissure immédiatement après la fissuration. Cependant, après 3 mois de conservation en chambre humide, la fissure disparaît presque complètement et il est pratiquement impossible de mesurer une ouverture résiduelle.

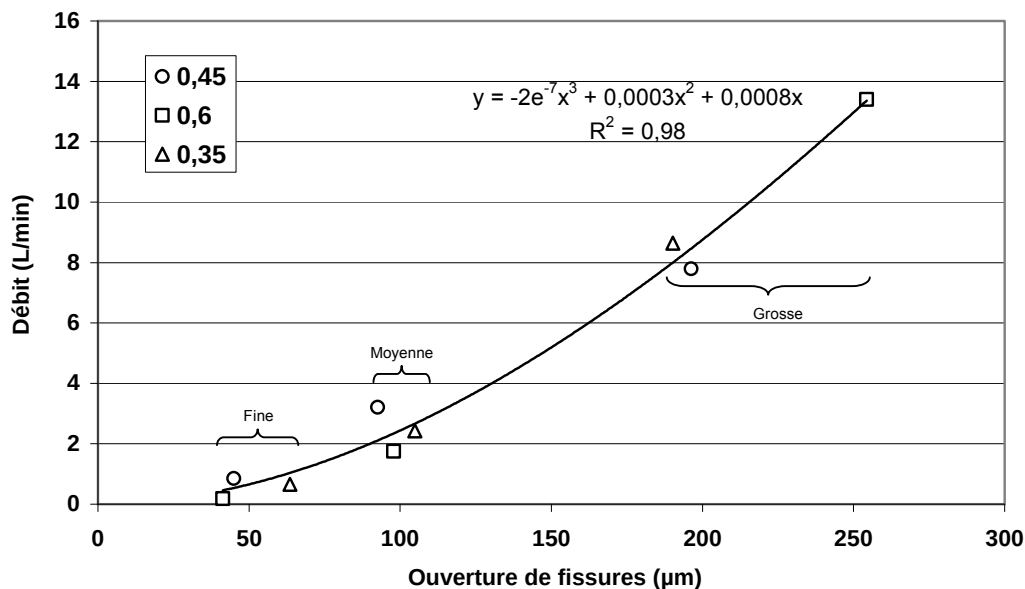


Figure 5. Relation entre le débit expérimental et l'ouverture initiale d'une fissure



Figure 6. Aspect visuel d'une fissure de 64 μm immédiatement après la fissuration et après 1 et 3 mois de conservation en chambre humide ($E/C=0,35$)

4.3 Évolution du débit en fonction du temps

La Figure 7 présente l'évolution des débits d'air en fonction du temps de conservation dans la chambre humide, après la fissuration initiale. Tous les débits d'air diminuent en fonction du temps, quel que soit le E/C ou l'ouverture initiale de la fissure. Cette tendance générale démontre l'existence d'un mécanisme d'autocicatrisation qui comble progressivement le volume des fissures et qui s'oppose au passage de l'air.

L'analyse de la pente des courbes en fonction du temps indique que la cinétique d'autocicatrisation est plus importante durant le premier mois de conservation après la fissuration initiale. Entre le 1^{er} et 5^e mois, les débits diminuent, mais à un taux environ 3 à 5 fois plus faible que celui mesuré durant le premier mois. L'évolution des débits en fonction du temps est influencée par l'ouverture initiale de la fissure. En valeur absolue, les débits chutent plus rapidement lorsque la fissure est plus ouverte. Globalement les résultats de la Figure 7 montrent que le rapport E/C n'a pas d'effet marqué sur l'évolution des débits en fonction du temps car les relations entre le débit, le temps et l'ouverture de la fissure changent très peu en fonction du rapport E/C du mortier.

Pour analyser plus précisément l'influence de l'autocicatrisation sur l'évolution des débits gazeux en fonction du temps, on peut exprimer les débits gazeux comme une proportion du débit initial (Q_0) mesuré immédiatement après la fissuration. Le débit relatif ($Q\%$) est alors exprimé en pourcentage de ce débit initial.

La Figure 8 présente l'ensemble des débits relatifs mesurés pour toutes les échéances, les rapports E/C et les catégories de fissures. Dans le cas des plus grosses fissures ($220 \pm 35 \mu\text{m}$), le débit relatif diminue progressivement en fonction du temps. Après 5 mois, le débit final est compris entre 5% et 50% du débit initial. Il n'est pas possible d'établir clairement l'effet du rapport E/C sur la diminution du débit des plus grosses fissures.

Le débit des fissures intermédiaires ($100 \pm 10 \mu\text{m}$) et des fissures plus fines ($50 \pm 15 \mu\text{m}$) diminue nettement plus rapidement durant le premier mois de conservation à l'humidité. Après 3 et 5 mois, la diminution se poursuit mais à un rythme beaucoup plus lent. Les résultats de la

Figure 8 montrent que plus la fissure est fine, plus le débit chute rapidement durant le premier mois pour ensuite fortement ralentir après 3 et 5 mois de conservation. Ce comportement général est observé quel que soit le rapport E/C.

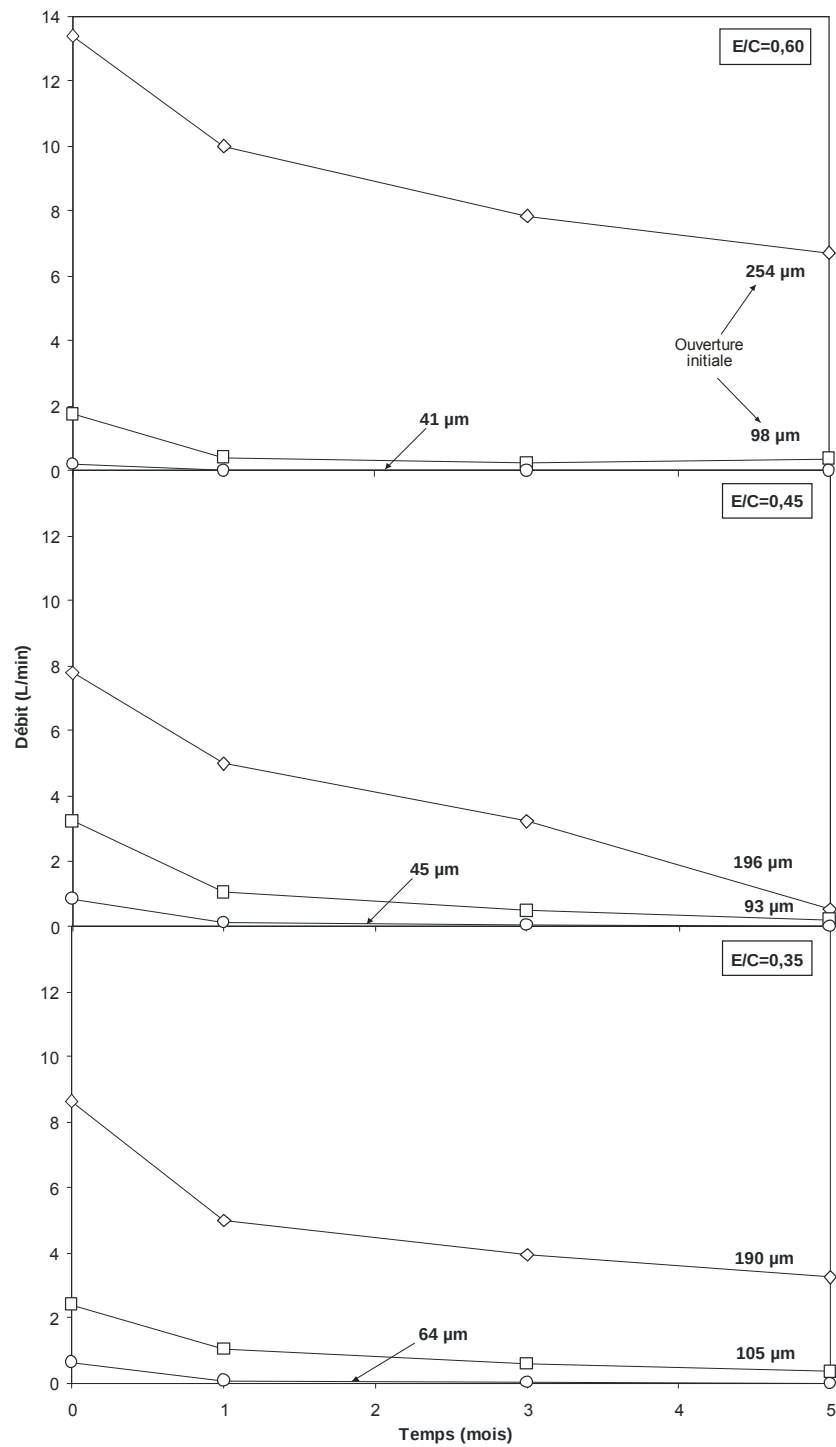


Figure 7. Évolution des débits en fonction du temps, du rapport E/C et de l'ouverture initiale de la fissure

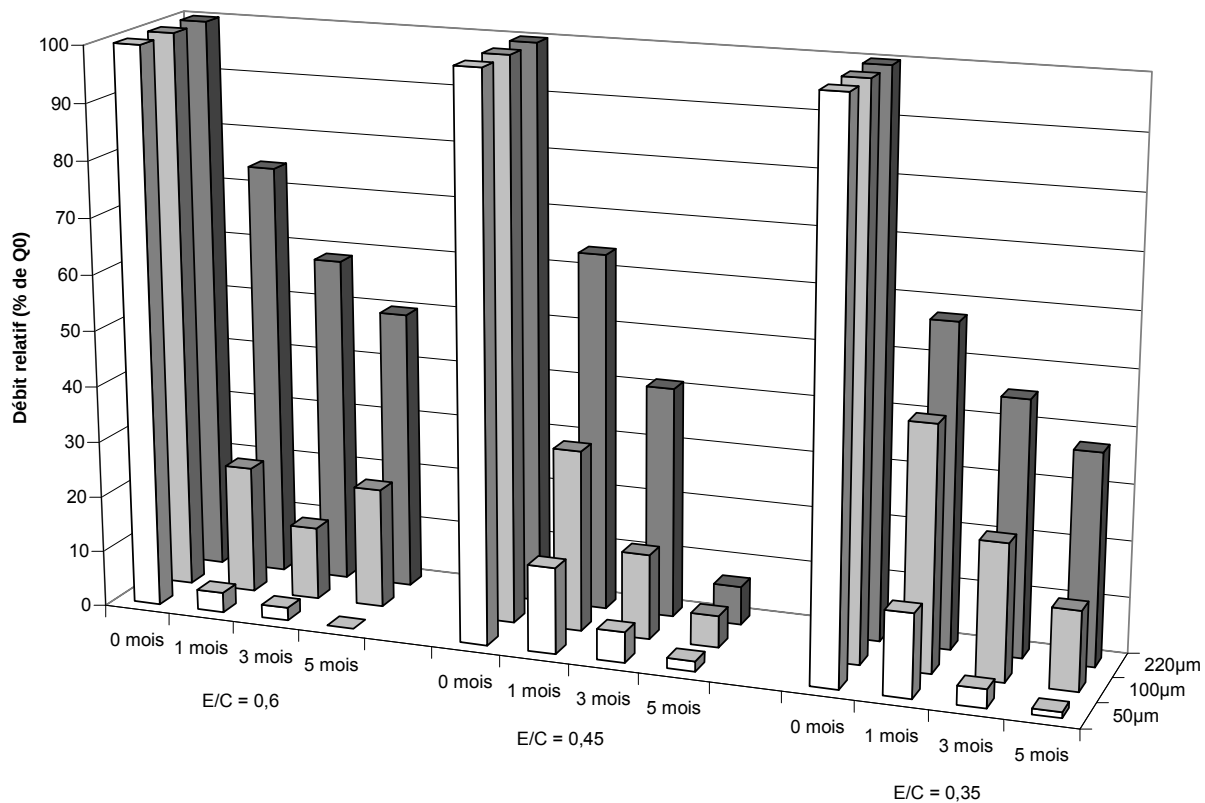


Figure 8. Débits relatifs en fonction du rapport E/C, du temps et de l'ouverture initiale de la fissure

L'évolution très similaire des débits relatifs, pour une catégorie de fissure donnée, suggère que le rapport E/C n'est pas un paramètre majeur de la cinétique d'autocicatrisation des mortiers de cette étude.

Globalement, la Figure 8 montre que la cinétique d'autocicatrisation des petites fissures est différente de celle des plus grosses. Dans le cas des petites fissures ($< 100 \mu\text{m}$), le débit chute très rapidement durant le premier mois, puis la baisse est beaucoup plus lente pendant les 4 mois suivants. Durant le premier mois, c'est vraisemblablement la formation d'hydrates et la carbonatation qui comblent une partie du volume de la fissure. Par la suite, ce phénomène se poursuit mais beaucoup plus lentement, probablement en raison de l'obstruction importante de la fissure qui limite l'apport d'humidité et du CO_2 nécessaires pour la poursuite des réactions.

Dans le cas des grandes fissures ($> 190 \mu\text{m}$), le colmatage est plus graduel car le volume à combler est plus grand. Même après un mois, la fissure est encore relativement peu obstruée.

L'humidité et le CO_2 sont donc toujours disponibles en grande quantité pour la poursuite des réactions d'hydratation et de carbonatation durant les 4 mois qui suivent.

4.4 Évolution de l'ouverture apparente en fonction du temps

L'ouverture apparente des fissures a été calculée à toutes les échéances et pour les trois types de mortiers. Ces ouvertures apparentes (W_a) ont été calculées à l'aide de l'Équation 1, en y insérant le débit expérimental (Q), puis en extrayant les racines du polynôme. L'analyse de l'évolution de l'ouverture apparente des fissures permet de quantifier plus précisément les mécanismes d'autocicatrisation dans les fissures.

La Figure 9 présente l'évolution de l'ouverture apparente en fonction du temps et pour les trois types de mortiers. Les résultats numériques ont été traités pour calculer les taux de cicatrisation exprimés en $\mu\text{m}/\text{mois}$. Comme dans le cas des débits, la cinétique de l'évolution de l'ouverture apparente est variable dans le temps. Elle est nettement plus rapide durant le premier mois suivant la fissuration.

Dans le cas du mortier avec un rapport E/C de 0,60, le taux de cicatrisation est d'environ $45 \mu\text{m}/\text{mois}$ durant le premier mois. Ce taux varie relativement peu en fonction de l'ouverture initiale de la fissure (38 à $56 \mu\text{m}/\text{mois}$). Entre le 1^{er} et le 3^e mois de conservation après la fissuration, le taux moyen de cicatrisation baisse très significativement pour atteindre un taux moyen d'approximativement $6 \mu\text{m}/\text{mois}$. Entre le 1^{er} et le 3^e mois, le taux de cicatrisation est fortement influencé par l'ouverture de la fissure. Il est plus élevé pour la fissure de $254 \mu\text{m}$ ($14 \mu\text{m}/\text{mois}$) mais très faible pour la petite fissure de $41 \mu\text{m}$ ($1 \mu\text{m}/\text{mois}$). L'évolution, en fonction du temps, des ouvertures apparentes pour les deux autres mortiers (0,45 et 0,35) est très similaire à celles du mortier avec un E/C de 0,60.

Globalement, les résultats de la Figure 9 indiquent que le rapport E/C et l'ouverture initiale de la fissure ont relativement peu d'influence sur le taux de cicatrisation durant le premier mois de conservation après la fissuration. Par exemple, pour les rapports E/C de 0,60, 0,45 et 0,35, les taux moyens de cicatrisation à 1 mois sont respectivement de $45 \mu\text{m}/\text{mois}$, $41 \mu\text{m}/\text{mois}$ et $50 \mu\text{m}/\text{mois}$. Ces taux de cicatrisation correspondent à des volumes de produits de cicatrisation formés durant le premier mois. Il s'agit en fait d'une estimation du volume surfacique correspondant approximativement au volume des produits de cicatrisation divisé par la surface totale des parois internes des fissures ($\mu\text{m}^3/\mu\text{m}^2 = \mu\text{m}$).

Ces résultats suggèrent que dans les fissures relativement jeunes, la cinétique et les mécanismes d'autocicatrisation (volume total des produits de cicatrisation) sont relativement peu influencés par la composition physico-chimique de la pâte ou par l'ouverture initiale de la fissure.

Comme dans le cas des débits, on peut analyser plus précisément l'influence de l'autocicatrisation sur l'évolution de l'ouverture apparente en fonction du temps, en exprimant l'ouverture apparente (W_a) comme une proportion de l'ouverture initiale mesurée immédiatement après la fissuration. L'ouverture apparente relative ($W_a\%$) est alors exprimée en pourcentage de cette ouverture initiale (W_o).

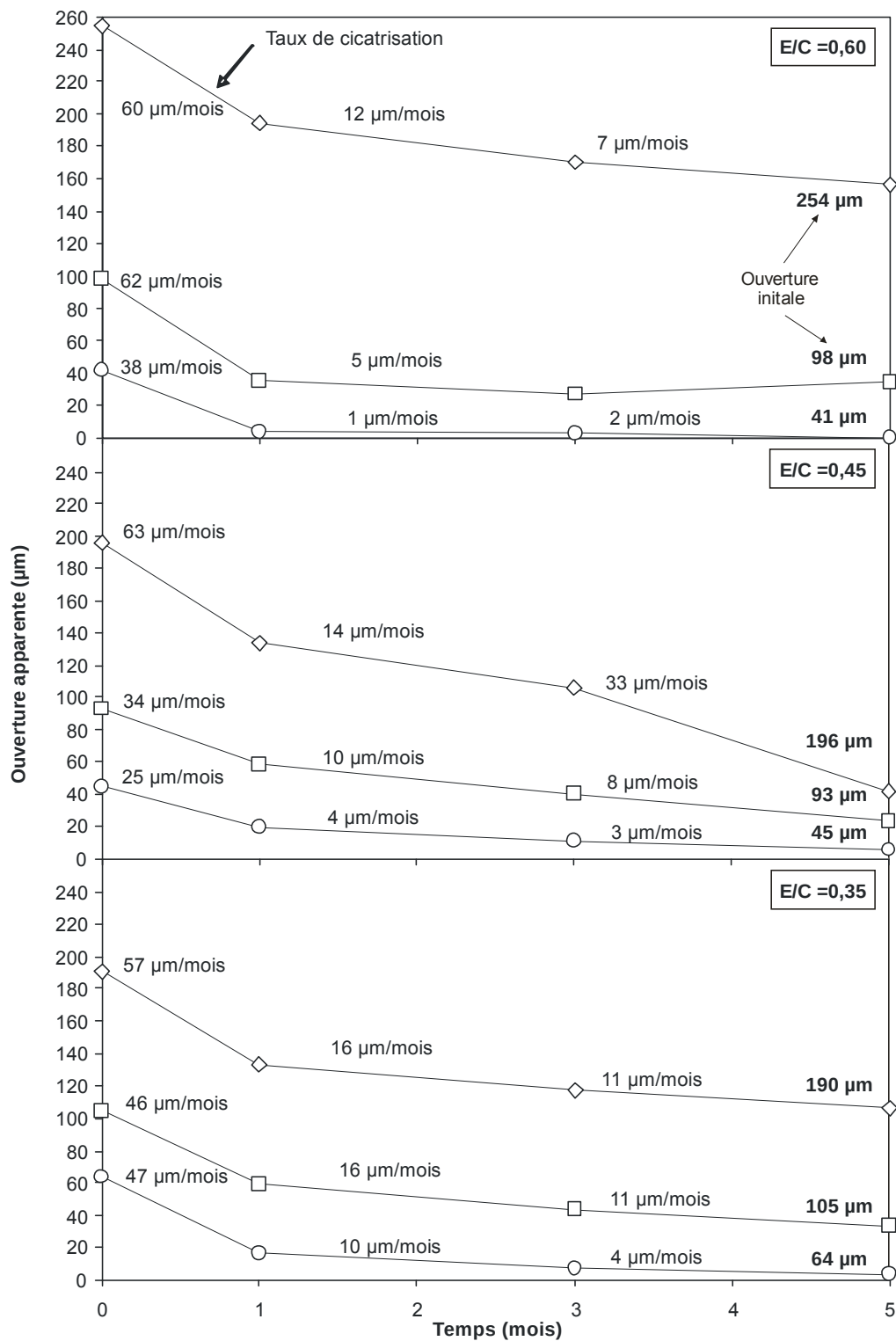


Figure 9. Évolution de l'ouverture apparente en fonction du temps, du rapport E/C et de l'ouverture initiale de la fissure

La Figure 10 présente l'ensemble des ouvertures apparentes relatives, calculées pour toutes les échéances, les rapports E/C et les catégories de fissures. Pour la catégorie des grosses fissures ($220 \pm 35 \mu\text{m}$), l'ouverture apparente est comprise entre 68% et 75% à 1 mois. Par la suite, l'ouverture apparente baisse progressivement et à un rythme relativement constant pour atteindre des valeurs comprises entre 20% et 60% à 5 mois. Le rapport E/C a relativement peu d'influence sur la cinétique d'évolution de l'ouverture apparente des grosses fissures.

Pour la catégorie des fissures moyennes ($100 \pm 10 \mu\text{m}$), l'ouverture apparente relative évolue plus rapidement en fonction du temps de conservation après la fissuration. La baisse est très rapide après 1 mois et les ouvertures relatives sont comprises entre 30% et 40% à cinq mois. Pour la catégorie des fines fissures ($50 \pm 15 \mu\text{m}$), l'ouverture apparente relative baisse encore plus rapidement dès le premier mois en atteignant des valeurs comprises entre 0% et 20% à 5 mois. Cette tendance générale s'observe pour tous les rapports E/C étudiés.

Globalement, les résultats de la Figure 10 montrent clairement que les effets de l'autocicatrisation sur l'ouverture apparente sont nettement plus importants dans le cas des fines fissures que dans le cas des grosses fissures. Ce phénomène peut s'expliquer par le taux de formation du volume des produits d'autocicatrisation qui semble relativement constant, quelle que soit l'ouverture initiale de la fissure (Figure 9). Par exemple, dans le cas d'une fissure de $250 \mu\text{m}$, la formation d'une épaisseur moyenne de produits d'autocicatrisation de $40 \mu\text{m}$ (durant le premier mois), engendre une diminution de seulement 15% de l'ouverture apparente. Dans le cas d'une fissure de $50 \mu\text{m}$, la même épaisseur de produits d'hydratation ($40 \mu\text{m}$), engendre une diminution de 80% de l'ouverture apparente.

Les données de la Figure 10 suggèrent que l'ouverture initiale d'une fissure influence la cinétique de l'autocicatrisation. Dans le cas des plus petites fissures ($< 100 \mu\text{m}$) l'ouverture apparente chute très rapidement durant le premier mois puis évolue beaucoup plus lentement par la suite. Cette cinétique plus lente résulte probablement du colmatage partiel de la fissure qui limite l'apport d'humidité et de CO_2 nécessaires pour la poursuite des réactions. Dans le cas des plus grosses fissures ($200 \mu\text{m}$), l'ouverture apparente chute, elle aussi, rapidement durant le premier mois. Cependant, durant les 4 mois qui suivent, la baisse est légèrement plus rapide que celle des fissures plus fines. L'évolution plus rapide (entre 1 et 5 mois) de l'ouverture apparente des grosses fissures résulte probablement de la plus grande disponibilité de l'humidité et du CO_2 dans la fissure.

4.5 Degré d'hydratation

Le Tableau 3 présente le degré d'hydratation des mortiers. Ces mesures ont été prises à 1 mois, soit en même temps que la fissuration initiale. Le degré d'hydratation des mortiers augmente avec le rapport E/C. Ce comportement est caractéristique des matrices cimentaires. Les valeurs obtenues dans le cadre de cette étude sont compatibles avec celles obtenues par Popic (Popic, 2010), pour des mortiers similaires. Globalement, les degrés d'hydratation obtenus par Popic sont un peu plus faibles car ils ont été mesurés après 14 jours de conservation en milieu scellé.

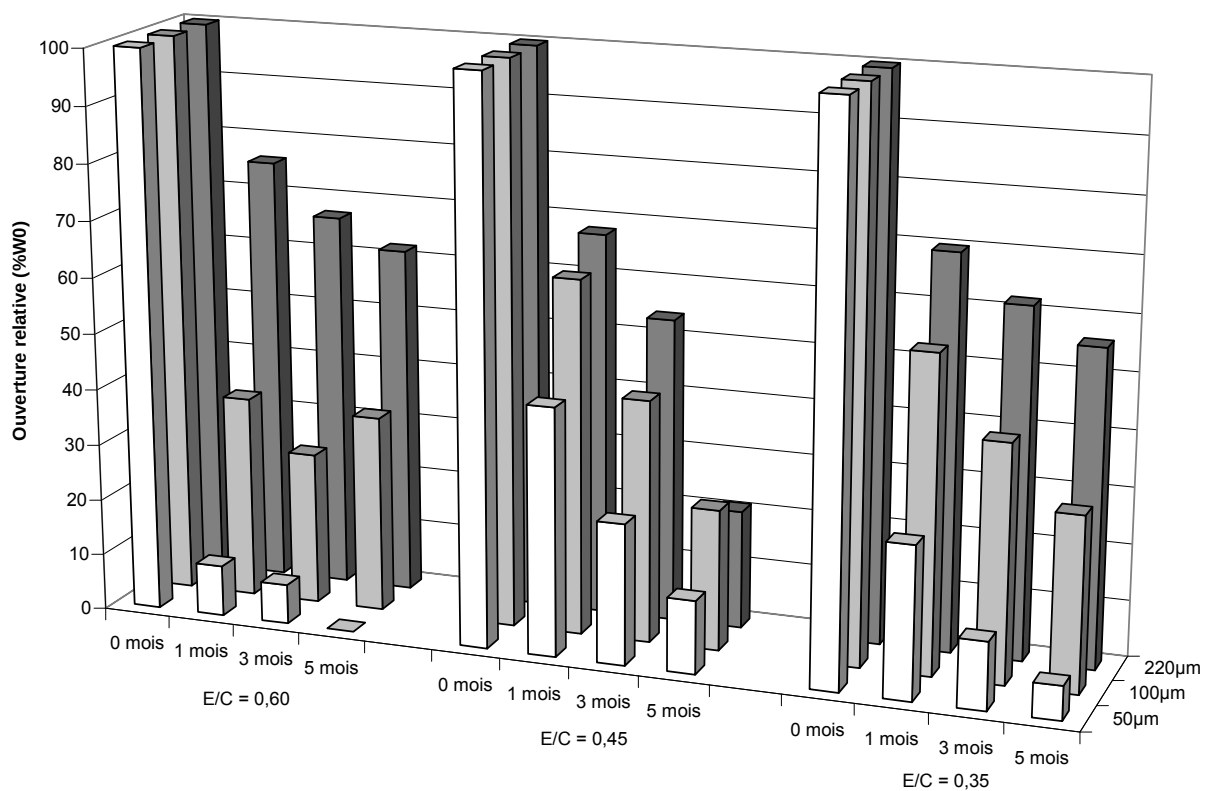


Figure 10. Ouvertures apparentes relatives en fonction du rapport E/C, du temps et de l'ouverture initiale de la fissure

Tableau 3. Degré d'hydratation des mortiers à 28 jours

Mortier	Degré d'hydratation (%)
E/C = 0,60	87
E/C = 0,45	83
E/C = 0,35	75

Dans les pâtes à faible rapport E/C ($< 0,40$), l'hydratation complète du ciment n'est généralement pas possible en raison d'un apport limité en eau externe lors du mûrissement humide. C'est principalement la faible perméabilité de la pâte qui limite l'apport d'eau externe. Le mortier avec un E/C de 0,35 possède un degré d'hydratation nettement plus faible que celui des deux autres mortiers. Au moment de la fissuration, il possède donc une plus grande réserve de ciment anhydre dont l'hydratation pourrait être réactivée par la formation de fissures. Ces fissures peuvent offrir un chemin préférentiel pour la pénétration de l'eau externe nécessaire pour hydrater le ciment anhydre.

Globalement, les résultats de cette étude ont montré que le rapport E/C n'est pas un paramètre majeur influençant les mécanismes d'autocicatrisation des mortiers étudiés. Ces résultats suggèrent que malgré une réserve de ciment anhydre plus importante, les matrices cimentaires à

faible rapport E/C n'ont pas nécessairement un plus grand potentiel d'autocicatrisation à court terme (0 à 5 mois).

5. CONCLUSION

Cette étude a permis de dégager les principales conclusions suivantes :

- Le cœur expansif, couplé à une cellule de mesure du débit d'air sec, permet d'engendrer une fissuration contrôlée dans des éprouvettes de mortier. Cette approche a été utilisée pour caractériser la cinétique des mécanismes d'autocicatrisation dans des matrices cimentaires.
- L'autocicatrisation des fissures engendre une diminution des débits d'air en fonction du temps de conservation en chambre humide. La diminution des débits est plus importante durant le premier mois de conservation après la fissuration initiale. Entre le 1^{er} et 5^e mois, les débits diminuent, mais à un taux environ 3 à 5 fois plus faible que celui mesuré durant le premier mois.
- Une relation polynomiale expérimentale de type $\text{Débit} = f(\text{Ouverture de fissure})^3$ a été utilisée pour estimer l'évolution de l'ouverture apparente d'une fissure en cours de cicatrisation.
- L'autocicatrisation a été quantifiée par ses effets sur les débits relatifs et les ouvertures apparentes relatives exprimés en pourcentage des valeurs initiales mesurées immédiatement après la fissuration. Les ouvertures et les débits relatifs baissent très rapidement durant le premier mois, mais la baisse subséquente (entre 1 et 5 mois) est beaucoup plus faible. Ce phénomène devient de plus en plus marqué pour les fissures de plus en plus fines.
- Le taux de formation des produits d'hydratation ($\mu\text{m}/\text{mois}$) durant le premier mois de conservation varie peu en fonction du rapport E/C et de l'ouverture initiale de la fissure. Ces résultats suggèrent que dans des fissures relativement jeunes, la cinétique et les mécanismes d'autocicatrisation (volume total des produits de cicatrisation) sont relativement peu influencés par la composition physico-chimique de la pâte ou par l'ouverture initiale de la fissure.
- Le rapport E/C et le degré d'hydratation avant la fissuration ne sont pas des paramètres majeurs de la cinétique d'autocicatrisation des mortiers de cette étude.
- La cinétique d'autocicatrisation est influencée par l'ouverture initiale d'une fissure. Dans le cas des petites fissures ($< 100 \mu\text{m}$), l'autocicatrisation est importante durant le premier mois, puis la baisse est beaucoup plus lente pendant les 4 mois suivants. Durant le premier mois, c'est vraisemblablement la formation d'hydrates et la carbonatation qui combleront une partie du volume de la fissure. Par la suite, ce phénomène se poursuit mais beaucoup plus lentement, probablement en raison de l'obstruction importante de la fissure qui limite l'apport d'humidité et du CO_2 nécessaires pour la poursuite des réactions. Dans le cas des grandes fissures ($> 190 \mu\text{m}$), l'autocicatrisation est plus progressive car le volume à combler est plus

6. REFERENCES

- Edvardsen, C. (1999). Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete. *ACI Materials Journal*, vol. 96, n° 4, p. 448-454.
- Gagné, R., Francois, R. et Masse, P. (2001). Chloride Penetration Testing of Cracked Mortar Samples. In *Third International Conference on Concrete under Severe Conditions of Environment and Loading - CONSEC'01* N. Banthia, K. Sakai and O. E. Gjory Eds., Vancouver, Canada, 198-205
- Ismail, M. (2006). Étude des transferts et de leurs interactions avec la cicatrisation dans les fissures pour prolonger la durée de service des infrastructures (ponts, centrales nucléaires). Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Toulouse, France, 234 p.
- Ismail, M., Gagné, R., Francois, R. et Toumi, A. (2007). Effect of Self-Healing on Airflow through Cracked Mortars. In *Proceedings of the 5th International Conference on Concrete under Severe Conditions of Environment and Loading - CONSEC 07* Toutlemonde, F., Tours, France, 4-6 juin 2007. Paris, LCPC. 649-656
- Jacobsen, S. (1996). Self healing of high strength concrete after deterioration by freeze/thaw. *Cement and Concrete Research*, vol. 26, n° 1, p. 55-62.
- Popic, A. (2010). Influence des ajouts minéraux, des granulats fins et de la température sur le développement et le contrôle du retrait endogène des matrices cimentaires. *Thèse de Doctorat*, Département de génie civil, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Canada, (Déposée le 12 avril 2010), 504 p.
- Reinhardt, H. (2003). Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width. *Cement and Concrete Research*, vol. 33, n° 7, p. 981-985.
- Sukhotskaya, S.S., Mazhorova, V.P. et Terekhin, Y.N. (1983). Effect of Autogenous Healing of Concrete Subjected to Periodic Freeze-Thaw Cycles. *Hydrotechnical Construction (English translation of Gidrotekhnicheskoe Stroitel'Stvo)*, vol. 17, n° 6, p. 294-296.