

1. Introduction

La première partie de ce chapitre montre comment les produits colmateurs ont été sélectionnés.

Dans la seconde partie de ce chapitre, la profondeur de pénétration / épaisseur de couche formée des produits colmateurs a été investiguée. Puis leur impact sur la porosité a été abordé. Ces deux points sont importants pour la compréhension et l'analyse des résultats des études d'efficacité des produits vis-à-vis du transport gazeux et de la carbonatation accélérée qui ont été réalisées par la suite.

Après l'évaluation de l'efficacité des produits à court terme, leur comportement à long terme a été étudié, en caractérisant leur vieillissement et en estimant leur perte de performances. Après cela, des projections de durabilité sur plusieurs dizaines d'années avec des scénarios différents selon le moment de l'application des produits ont été proposées. L'objectif est de juger l'intérêt d'appliquer les produits en préventif sur les ouvrages neufs ou en curatif sur les ouvrages existants.

Dans la troisième partie, dans le but de mieux évaluer l'efficacité des produits sur les ouvrages, l'effet de l'ouverture/refermeture des fissures induite en raison des phénomènes thermo-hydriques, de l'effet du vent et du tassement différentiel sera abordé.

Enfin, une comparaison entre les produits avec l'ensemble des critères discutés dans ce chapitre a été faite dans le but d'aider l'industriel à se positionner sur un des trois produits testés.

2. Pré-sélection des produits

Comme évoqué dans la partie §2.2.1 du chapitre II, quatre produits colmateurs ont été présélectionnés et testés dans le cadre de cette étude, il s'agit de :

- Un revêtement (C) : peinture acrylique (AC)
- Un imprégnant organique (I) : acrylique (AI)
- Un imprégnant minéralisateur (I) : silicate de lithium (LS)
- Un imprégnant hydrophobe (H) : crème à base de silane (SC)

La sélection finale des produits sur lesquels s'est basé ce projet de thèse a été faite suite à des essais de diffusion gazeuse et de carbonatation accélérée qui ont été réalisés sur des échantillons de mortier traités par ces différents produits. Les échantillons destinés à la diffusion gazeuse ont été traités sur les deux faces.

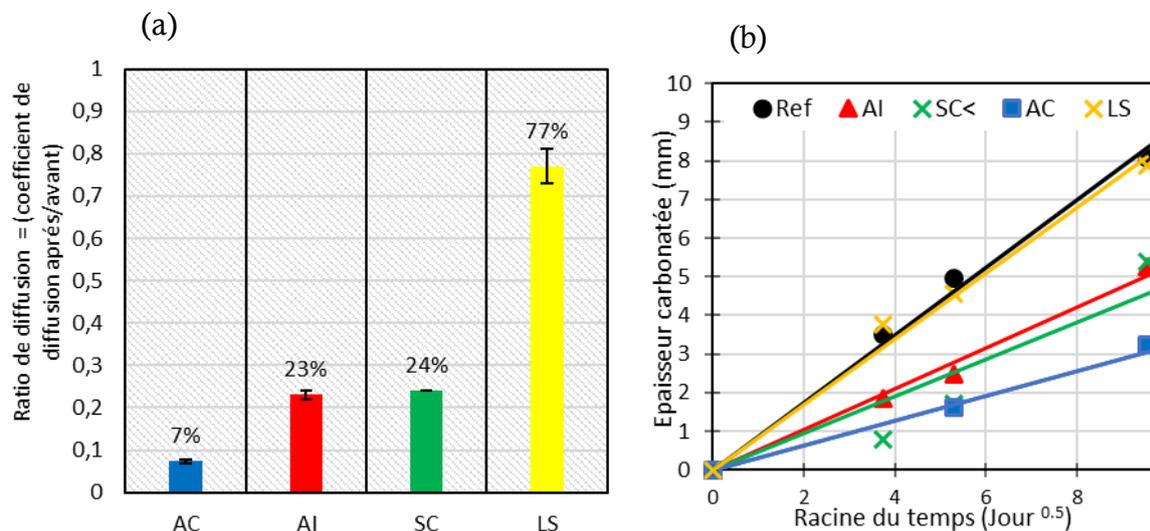


Figure 68: Résultats de l'étude préliminaire pour la sélection des produits : (a) diffusion gazeuse, (b) carbonatation accélérée

Les résultats de la diffusion gazeuse sont exprimés en ratio de diffusion (rapport du coefficient de diffusion de O₂ après/coefficient de diffusion O₂ avant traitement). Plus le ratio est faible plus le produit est efficace (Figure 68 (a)).

Les résultats de ces essais (Figure 68 (a) et (b)) ont montré l'inefficacité du silicate de lithium (LS) vis-à-vis de la cinétique de carbonatation et une réduction très faible de la diffusion. Ces résultats ont donc permis de choisir les trois produits les plus performants, il s'agit de : AI, AC et SC. Les résultats de ces produits seront discutés dans les sections (§ 3.3 et 3.5) de ce document.

3. Matériaux non fissurés

3.1 Profondeur de pénétration des produits

Le pouvoir pénétrant des produits d'imprégnation est un facteur déterminant quant à leur efficacité. Cette capacité à pénétrer dépend de la nature du support : plus il est poreux plus les produits pénétreront plus facilement dans la matrice cimentaire, à condition que cette porosité ne soit pas saturée. Afin de mesurer cette profondeur de pénétration, différentes techniques et méthodes ont été testées et utilisées.

En ce qui concerne l'imprégnation hydrophobe, la technique la plus utilisée dans la littérature [152], [153], [154] consiste à fendre l'échantillon en deux et de mouiller ensuite la surface du plan de fissure, une différence de teinte est alors obtenue entre les zones imprégnée et non imprégnée. Cette méthode a été utilisée pour déterminer la profondeur de pénétration de la crème de silane (SC). La Figure 69 montre que SC pénètre de quelques millimètres (4 à 5 mm) au bout de 7 jours.

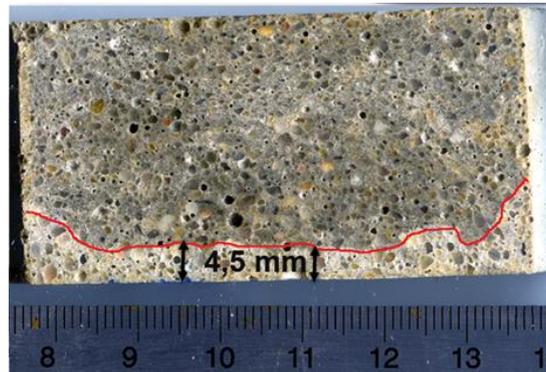


Figure 69 : Photo de la profondeur de pénétration de SC

Cette profondeur de pénétration est assez proche de celles observées par Schueremans et al [112] : 6 à 9 mm , Orłowsky [155] : 7 mm. et Basheer et al [154]. Dai et al [153] ont mesuré la profondeur de pénétration de plusieurs produits à base de silane/siloxane. Leurs résultats montrent des profondeurs allant de 2 à 25 mm.

En ce qui concerne l'imprégnation acrylique (AI). Une charge a été ajoutée au produit pour ensuite faire une observation de l'échantillon traité au microscope optique (MO). La Figure 70 montre qu'un revêtement d'une épaisseur d'environ 100 μm s'est formé à la surface. Néanmoins, il est difficile de déterminer la profondeur de pénétration même si une pénétration du produit dans une bulle d'air est observée sur la (Figure 70) Des analyses au microscope électronique (MEB/EDS) ont ensuite été effectuées en rajoutant une couche de laque d'argent afin de distinguer le carbone de l'enrobage qui est une résine époxy, du carbone du produit AI (Acrylique). Une pénétration du produit AI dans le matériau à travers des microfissures est alors observée. Cependant, la détermination d'un profil de pénétration comme pour SC n'a pas été possible.

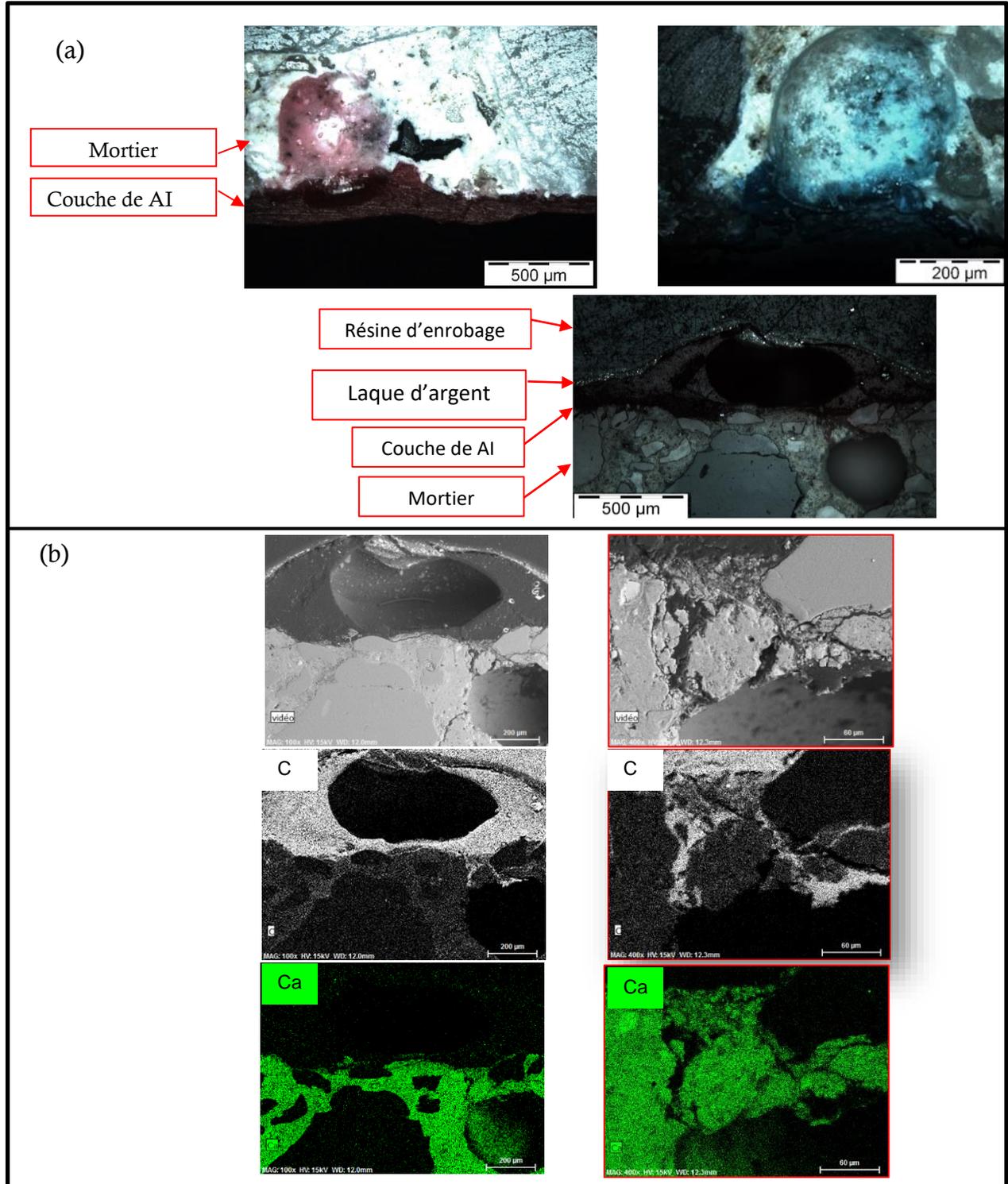
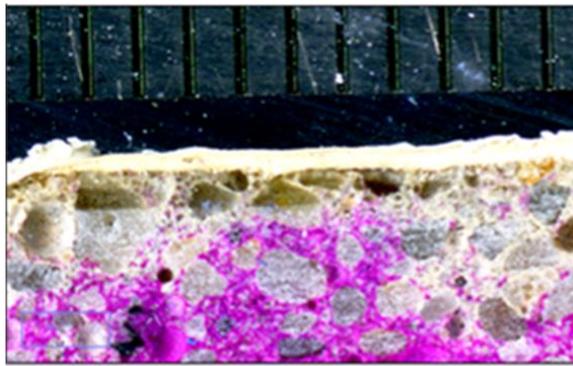


Figure 70 : Images MO (a) et MEB / EDS (b) d'un échantillon de mortier traité par de AI

En ce qui concerne le produit de revêtement (peinture acrylique AC), la (Figure 71) montre la formation d'un film continu à la surface de l'échantillon traité d'une épaisseur d'environ $400 \pm 150 \mu\text{m}$.



Epaisseur de la couche formée $400 \pm 150 \mu\text{m}$

Figure 71 : Photo de l'épaisseur du revêtement AC formé sur la surface de l'échantillon

3.2 Impact des produits colmateurs sur la porosité

Afin d'analyser l'efficacité des produits colmateurs vis-à-vis du transport et de la carbonatation dans le matériau cimentaire, il est nécessaire d'étudier leur impact sur la porosité. Pour cela, des essais de porosimétrie par intrusion de mercure ont été réalisés sur des échantillons de différente nature (mortier, pâte de ciment et béton des TAR) préalablement découpés ($1 \times 1 \times 2$ cm) puis traités sur toute leur surface par AI et SC. Les échantillons ont été ensuite lyophilisés suivant la procédure décrite dans la partie §2.2.3.2 du chapitre II.

Les résultats des densités des distributions de pores déduites des essais de porosimétrie par intrusion de mercure ont été divisées par la porosité de chaque prélèvement afin de les rendre comparables.

A partir des courbes de distribution porales des échantillons des bétons des TAR et de mortier (Figure 72 et Figure 73), 3 modes poreux sont distingués :

i. Mode poreux à $d_p \sim 0,4 \mu\text{m}$

Le pic à $d_p \sim 0,4 \mu\text{m}$ correspond à la macroporosité créée par la présence de grains de sable (mortier), qu'on peut assimiler aux pores de l'ITZ (Interface Transition Zone). Il s'agit d'une zone de transition formée à l'interface granulat / pâte [16].

ii. Mode poreux $d_p \sim 0,06 \mu\text{m}$

Le pic à $d_p \sim 0,06 \mu\text{m}$ peut être assimilé aux pores capillaires [16].

iii. Mode poreux $d_p \sim 0,003 \mu\text{m}$

Le mode poreux à $d_p \sim 0,003 \mu\text{m}$ correspond aux pores de gel de C-S-H.

En ce qui concerne la pâte de ciment, deux des trois modes sont distingués : (ii) et (iii) correspondants respectivement à la porosité capillaire et la porosité des hydrates.

Pour les échantillons de mortier, un affinement de la porosité capillaire des échantillons traités par rapport aux non traités est observé (Figure 72). Cet affinement est plus marqué dans le cas de SC. Ceci est probablement dû à la formation d'un polymère polysiloxane sur les parois internes des pores capillaires. Un affinement moins marqué est observé sur les échantillons traités par AI. Ces résultats sont en phase avec ceux du profil de pénétration des produits (§3.1). SC qui pénètre de quelques millimètres dans le mortier bouche partiellement la porosité capillaire. Cette observation est en phase avec les résultats de Woo et al [156] qui ont montré à l'aide d'images MEB que les pores de quelques μm de diamètre étaient partiellement ou entièrement remplis par les produits à base de silane siloxane. Et en ce qui concerne AI, qui pénètre de façon hétérogène à travers les microfissures et les bulles d'air, il ne réduit que de peu la porosité.

Pour les échantillons de béton des TAR, un affinement plus marqué de la porosité capillaire est observé pour les échantillons traité par SC (Figure 73).

Les résultats des pâtes de ciment (Figure 74) ne montrent aucun effet des produits quant à la distribution porale dans la pâte.

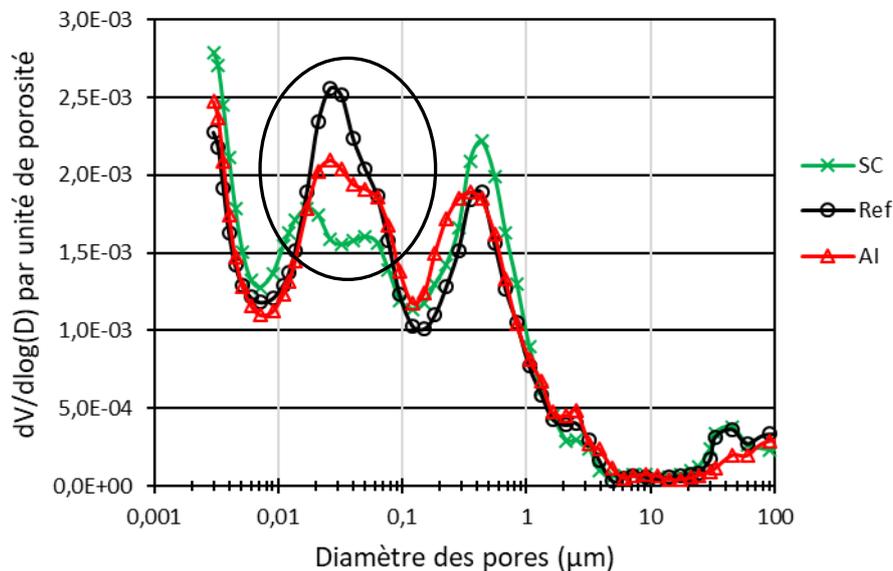


Figure 72 : Distribution des volumes poreux en fonction des diamètres d'accès des pores des échantillons de mortier

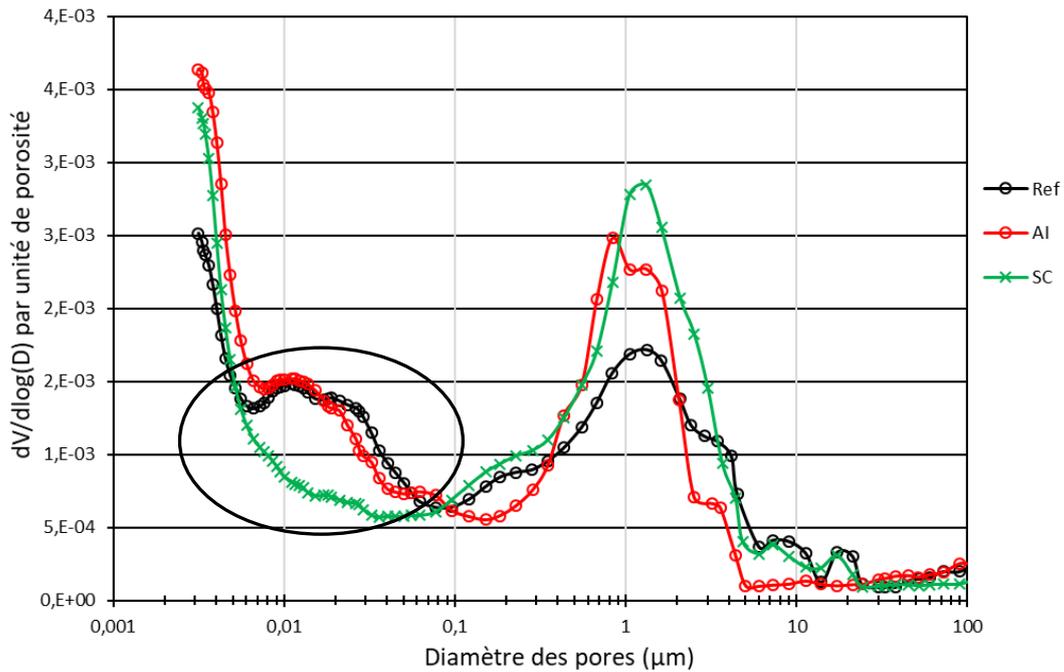


Figure 73 : Distribution des volumes poreux en fonction des diamètres d'accès des pores des échantillons de béton des TAR

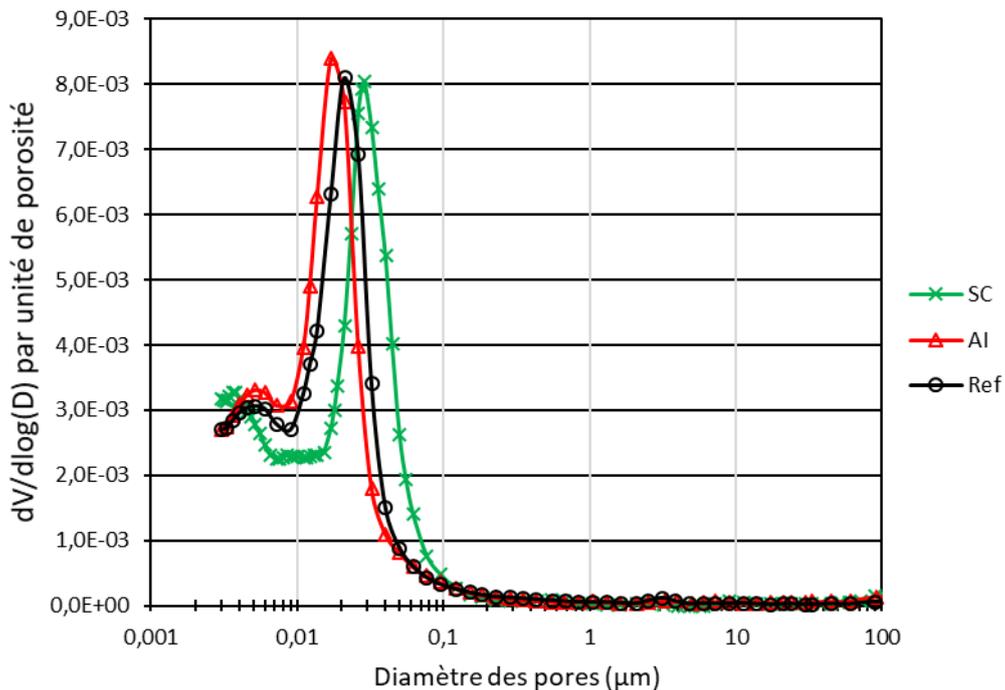


Figure 74 : Distribution des volumes poreux en fonction des diamètres d'accès des pores des échantillons de pâte de ciment

Le rayon critique se situant au niveau des pic des pores capillaires et défini comme étant le rayon à partir duquel il se forme un chemin continu d'écoulement à travers le matériau.

Les pores capillaires influencent donc très fortement les phénomènes de transport dans les matériaux cimentaires [4], [5].

3.3 Efficacité des produits vis-à-vis de la diffusion gazeuse

3.3.1 Influence du nombre de couches

Les résultats des essais de diffusion gazeuse (Figure 75) ont montré que tous les produits réduisent le coefficient de diffusion des échantillons de mortier traités, cette réduction est variable selon le produit. Elle est exprimée par le ratio de diffusion (rapport du coefficient de diffusion des échantillons traités / coefficient de diffusion des échantillons non traités). Plus le rapport est faible, plus la réduction de la diffusion apportée par les produits est importante.

La réduction obtenue est différente d'un produit à un autre. En effet, en examinant d'abord les échantillons traités sur les deux faces, Il est possible de constater que AC a un ratio de diffusion de 0,07 (réduction du coefficient de diffusion de 93 %). En ce qui concerne les deux autres produits, AI et SC, la réduction est moins importante avec des ratios compris entre 0,23 et 0,24. Pour les échantillons traités sur une face, la réduction est beaucoup moins importante. Le ratio de AC passe de 0,07 à 0,23. Pour AI et SC, Le ratio augmente fortement et passe respectivement d'un ratio d'environ 0,23 et 0,24 à 0,64 et 0,69.

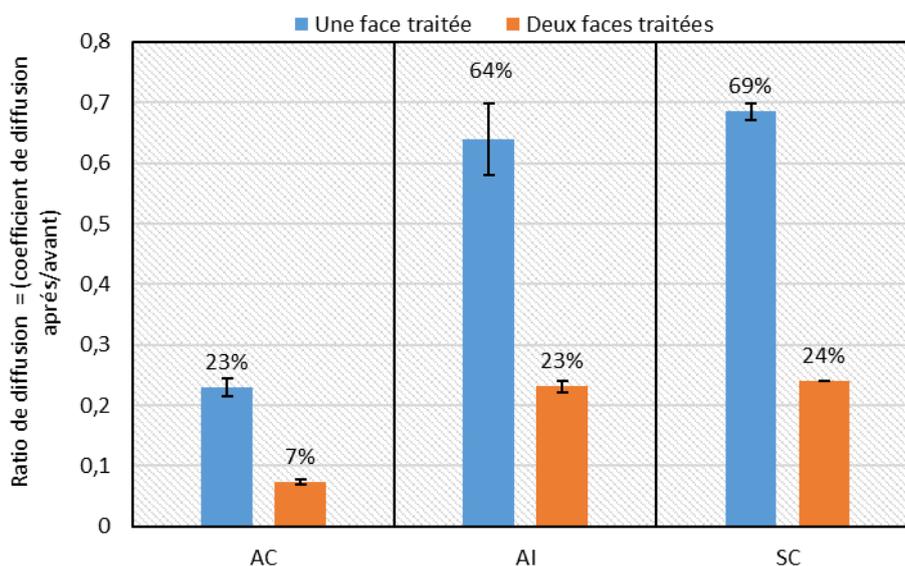


Figure 75 : Influence du traitement sur la diffusion des gaz (rapport de diffusion) dans les mortiers traités

3.3.2 Influence du type de matériau

Après avoir évalué l'impact des produits colmateurs sur la diffusion gazeuse des échantillons de mortier. Il est important d'évaluer leur efficacité sur les bétons des TAR mais également sur des pâtes de ciment. La Figure 76 compare les ratios de diffusion apportés par les trois produits sur les échantillons de mortier, béton des TAR et pâte de ciment. Pour les échantillons de mortier, le résultat présenté est une moyenne sur 3

échantillons. En ce qui concerne les bétons des TAR, le ratio est une moyenne sur 4 échantillons et enfin pour les pâtes de ciment, le ratio est une moyenne sur deux échantillons.

La première observation qui peut être faite est la forte efficacité de AC sur les trois types de matériaux avec un ratio de 0,03 sur la pâte de ciment et un ratio aux alentours de 0,2 sur les échantillons de mortier et de béton. AI affiche des ratios très différents suivant le type de matériau sur lequel il est appliqué. En effet, une efficacité maximale est observée sur la pâte de ciment avec un ratio de 0,01 et des réductions beaucoup plus faibles avec une plus grande variabilité sur les échantillons de mortier et des bétons TAR avec un ratio d'environ 0,65. Enfin pour SC, des ratios de 0,48, 0,69 et 0,78 sont à noter respectivement sur les échantillons de béton, mortier et pâte de ciment. Cette réduction est plus marquée sur les bétons et qui présentent le ratio de diffusion le plus faible des trois types de matériau.

Cependant, il est important de noter la forte variabilité des résultats des bétons. Ceci peut s'expliquer par la grande hétérogénéité de ces échantillons sur lesquels la fraction volumique des granulats peut être très différente d'un échantillon à un autre.

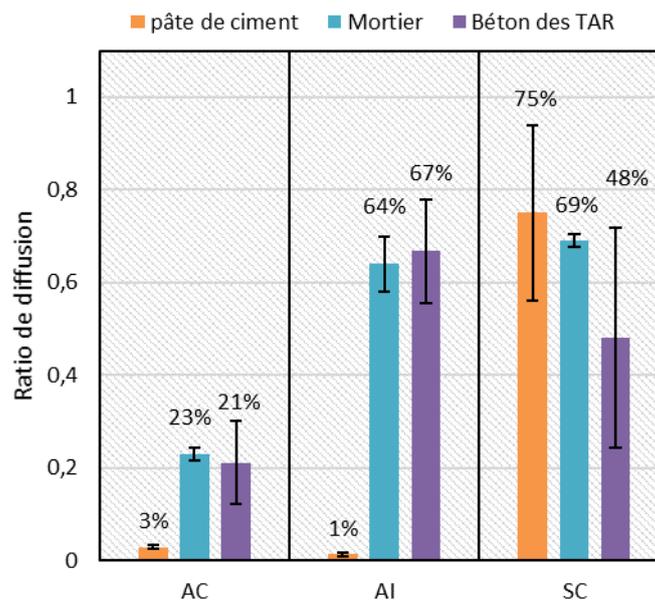


Figure 76 : Ratios de diffusion apportés par les produits sur les différents types de matériaux (une face traité)

3.4 Efficacité vis-à-vis de la perméabilité au gaz

Les essais de perméabilité au gaz ont été réalisés pour chaque échantillon de mortier à trois pressions différentes de 2, 4 et 6 bars dans le but de déterminer graphiquement le coefficient de perméabilité intrinsèque. La perméabilité intrinsèque (K_v) est obtenue en extrapolant la courbe expérimentale: l'intersection avec l'axe vertical correspond à une pression d'essai infinie pour laquelle il n'existe plus d'écoulement moléculaire (Figure 77) (approche de Klinkenberg, 1941 [157]).

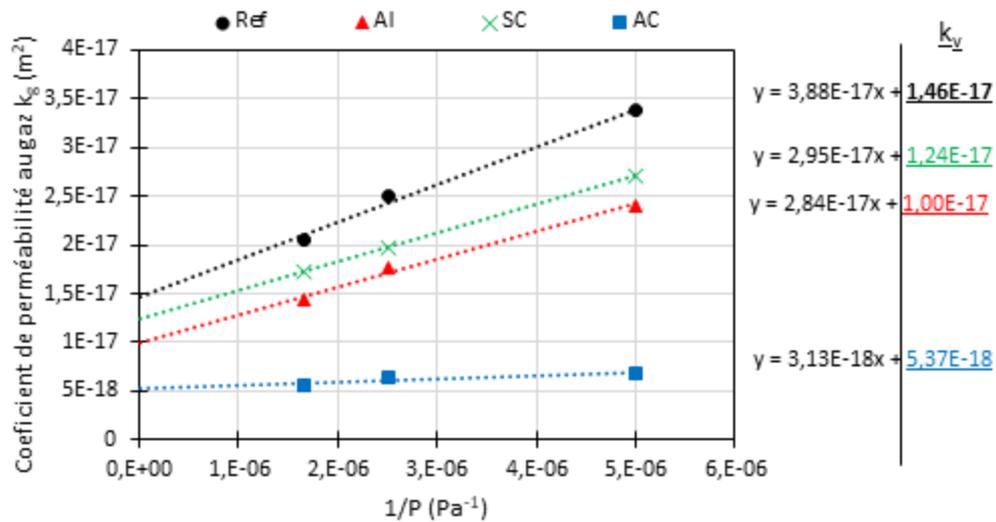


Figure 77 : Variation de la perméabilité mesurée K_g en fonction de la pression appliquée : détermination de la perméabilité intrinsèque K_v

En représentant les résultats en termes de ratio de perméabilité (= moyenne sur deux échantillons du rapport du coefficient de perméabilité intrinsèque avant après / coefficient de perméabilité intrinsèque avant traitement par les produits) (Figure 78), on constate une bonne efficacité de AC avec un ratio de 0,28. Et un ratio de 0,64 pour AI.

En ce qui concerne SC, aucune réduction de la perméabilité n'est observée (ratio d'environ 1). Ces résultats de SC sont comparables avec ceux des études menées par Basheer et al [8] et Dang et al [9] qui montrent que le silane et le siloxane n'ont pas d'effet significatif sur la perméabilité au gaz.

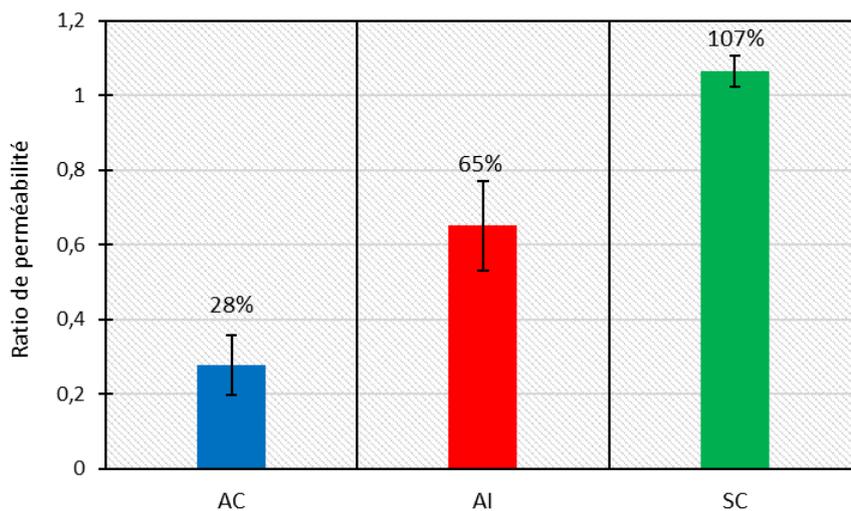


Figure 78 : Ratio de perméabilité des trois produits colmateurs

La (Figure 79) montre la corrélation entre les coefficients de diffusion D_e (O_2) et de perméabilité intrinsèque. On remarque une corrélation moyenne entre la diffusion et la

perméabilité au gaz. Ceci veut dire que le chemin parcouru par le gaz dans les différents échantillons, n'est pas tout à fait le même en diffusion et en perméation.

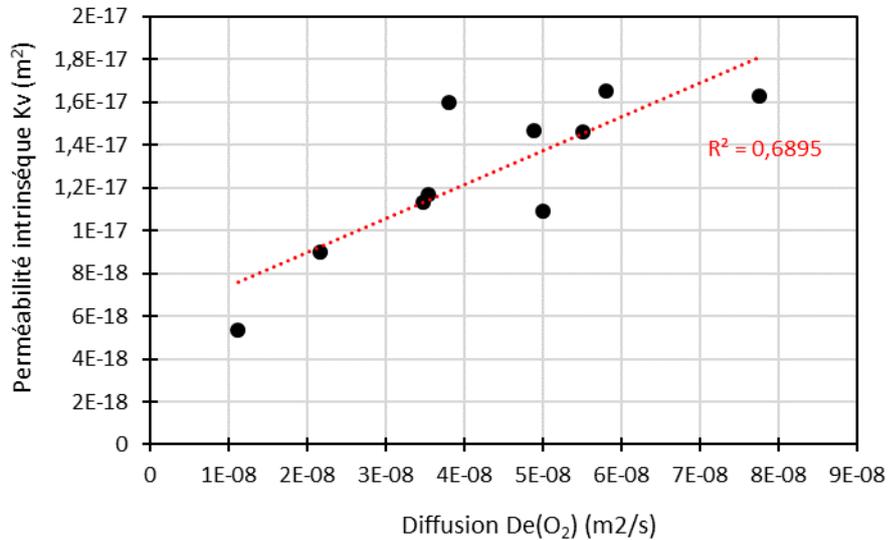


Figure 79 : Corrélation des perméabilités intrinsèques K_v avec les coefficients de diffusion gaz

En exprimant cette corrélation en termes de ratio de diffusion vs ratio de perméabilité (Figure 80), AC affiche une bonne corrélation contrairement aux deux autres produits. Cette différence de ratios de diffusion et de perméabilité veut dire que AI et surtout SC ont un effet différent sur ses deux mécanismes de transport.

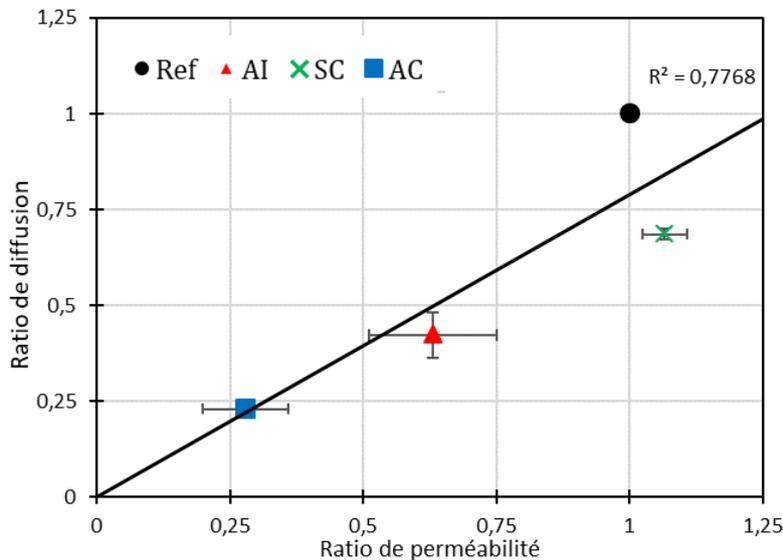


Figure 80 : Corrélation entre diffusion et perméabilité au gaz

3.5 Efficacité des produits vis-à-vis de la carbonatation accélérée

Les résultats des essais de carbonatation accélérée (Figure 81) ont été conformes à ceux de la diffusion (Figure 75). SC et AI réduisent l'épaisseur carbonatée. Elle est d'environ 5,5 à 5,6 mm sur les échantillons traités par SC et AI après 6 mois de carbonatation accélérée, tandis qu'elle est de 10 mm sur les échantillons non traités après la même période. Cette réduction apportée par la crème de silane (SC) est en phase avec les résultats de l'étude de Zhang et al [108]. Ces derniers ont observé dans leur étude, qu'un échantillon traité avec une crème à base de silane présente une épaisseur carbonatée de 5 mm à 28 jours, soit deux fois moins que l'échantillon non-traité (10 mm).

Pour AC, comme pour la diffusion gazeuse, l'efficacité du produit est plus importante que celle des deux autres produits. L'épaisseur carbonatée des échantillons traités avec AC est de 3,2 mm après 6 mois d'exposition.

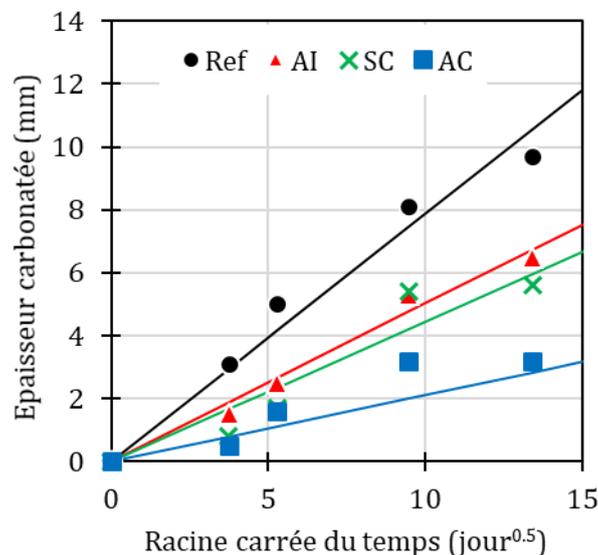


Figure 81 : Influence du traitement sur la cinétique de carbonatation accélérée (25°C, 55% RH et 3% CO₂)

3.6 Corrélation entre la carbonatation accélérée et la diffusion gaz

La carbonatation est gouvernée par la diffusion du CO₂ à travers la zone carbonatée. La plupart des modèles de carbonatation existants sont basés sur la diffusion du CO₂.

Le modèle le plus simple est basé sur la solution analytique de la deuxième loi de Fick (en régime permanent) :

$$x_c(t) = k\sqrt{t} \quad \text{Équation 53}$$

Avec : $x_c(t)$ profondeur carbonatée au temps t et k coefficient de carbonatation.

CHAPITRE III : IMPACT DES PRODUITS COLMATEURS SUR LES PHENOMENES DE TRANSPORT ET DE LA CARBONATATION

Dans le cadre de ce travail, afin de faire le lien entre la diffusion gazeuse et la vitesse de carbonatation, le modèle de Papadakis a été choisi [52], [53] avec lequel, k peut être écrit comme suit :

$$k = \sqrt{\frac{2 D_c(\text{CO}_2)[\text{CO}_2]}{[\text{CaO}]}} \quad \text{Équation 54}$$

Avec: $D_c(\text{CO}_2)$ coefficient de diffusion dans le matériau carbonaté, $[\text{CO}_2]$ la concentration du CO_2 dans l'air et $[\text{CaO}]$ la concentration de la matière carbonatable.

Pour un échantillon non traité (Ref), k peut s'écrire comme suit :

$$k_{\text{acc}}^{\text{Ref}} = \sqrt{\frac{2 D_c^{\text{Ref}}(\text{CO}_2)[\text{CO}_2]}{[\text{CaO}]}} \quad \text{Équation 55}$$

Avec: $k_{\text{acc}}^{\text{Ref}}$ coefficient de carbonatation accélérée de l'échantillon non traité et $D_c^{\text{Ref}}(\text{CO}_2)$ coefficient de diffusion du CO_2 dans un matériau carbonaté non traité.

En ce qui concerne les échantillons traités, pour un échantillon traité avec le produit X, k s'écrit :

$$k_{\text{acc}}^{\text{X}} = \sqrt{\frac{D_c^{\text{X}}(\text{CO}_2)[\text{CO}_2]}{[\text{CaO}]}} \quad \text{Équation 56}$$

Avec: $k_{\text{acc}}^{\text{X}}$ coefficient de carbonatation accélérée du matériau traité avec le produit X et $D_c^{\text{X}}(\text{CO}_2)$ coefficient de diffusion du CO_2 dans un matériau carbonaté traité avec le produit X.

Il faut noter que les valeurs du coefficient de diffusion du CO_2 à travers les matériaux carbonatés et traités n'ont pas été mesurés dans le cadre de ce travail de thèse. Par conséquent, l'hypothèse selon laquelle le produit a le même effet de réduction sur le mortier carbonaté que sur le matériau non carbonaté a été émise. Cette réduction est supposée identique quel que soit le gaz diffusant (CO_2 ou O_2), ce qui amène à :

$$\frac{D_c^{\text{X}}(\text{CO}_2)}{D_c^{\text{Ref}}(\text{CO}_2)} = \frac{D_{\text{nc}}^{\text{X}}(\text{O}_2)}{D_{\text{nc}}^{\text{Ref}}(\text{O}_2)} \quad \text{Équation 57}$$

En comparant les coefficients de carbonatation accélérée des échantillons traités et non traités, nous pouvons montrer que :

$$k_{\text{acc}}^{\text{X}} = k_{\text{acc}}^{\text{Ref}} \sqrt{\frac{D_{\text{nc}}^{\text{X}}(\text{O}_2)}{D_{\text{nc}}^{\text{Ref}}(\text{O}_2)}} \quad \text{Équation 58}$$

CHAPITRE III : IMPACT DES PRODUITS COLMATEURS SUR LES PHENOMENES DE TRANSPORT ET DE LA CARBONATATION

Avec : k_{acc}^{Ref} et k_{acc}^X les coefficients de carbonatation accélérée des matériaux traités et non traités par le produit X; $D_{nc}^{Ref}(O_2)$ $D_{nc}^X(O_2)$ les coefficients de diffusion dans les matériaux non carbonatés et carbonatés.

La Figure 82 compare les coefficients de carbonatation estimés (k estimé) avec les coefficients mesurés expérimentalement (k mesuré). Les résultats montrent une bonne corrélation entre la diffusion gaz et les résultats de la carbonatation accélérée.

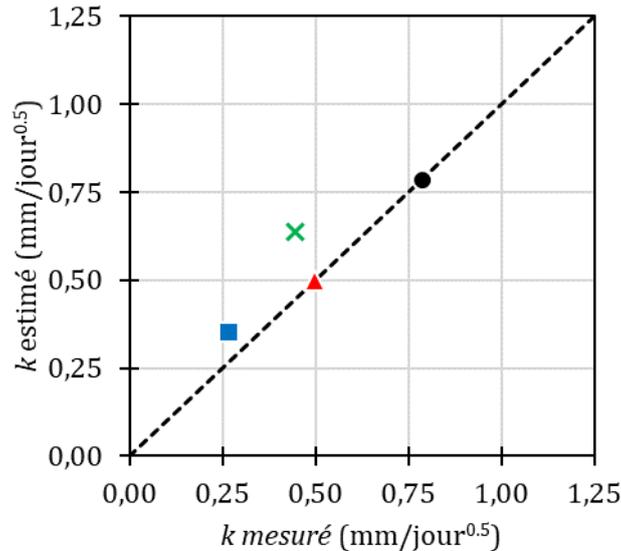


Figure 82 : Comparaison entre la diffusion gazeuse et la carbonatation accélérée

On peut alors estimer l'impact des produits sur le temps de carbonatation de l'enrobage du béton. Nous considérons un élément structural en béton armé soumis à l'atmosphère (température ambiante, RH = environ 55 % et 0,03 % of CO₂), sa cinétique de carbonatation peut être déterminée à l'aide la formule suivante :

$$e = k_{nat} \sqrt{t_c} \quad \text{Équation 59}$$

Avec : t_c le temps nécessaire pour carbonater l'enrobage d'épaisseur e et k_{nat} le coefficient de carbonatation en conditions naturelles (0,03% de CO₂).

Selon le modèle de Papadakis, k_{nat} peut être déterminé comme suit :

$$k_{nat} = k_{acc} \sqrt{\frac{[CO_2]_{nat}}{[CO_2]_{acc}}} = k_{acc} \sqrt{\frac{0,03\%}{3,00\%}} = \frac{k_{acc}}{10} \quad \text{Équation 60}$$

t_c peut ainsi s'écrire comme ceci :

$$t_c = 100 \left(\frac{e}{k_{acc}} \right)^2 \quad \text{Équation 61}$$

Ensuite, afin d'estimer l'apport des produits en termes de gain de temps de carbonatation, Le ratio $\frac{t_c^X}{t_c^{Ref}}$ peut être calculé comme suit :

$$\frac{t_c^X}{t_c^{Ref}} = \left(\frac{k_{acc}^{Ref}}{k_{acc}^X} \right)^2 \quad \text{Équation 62}$$

Le (Tableau 10) donne le gain apporté par les produits en termes de temps de carbonatation.

Tableau 10 : Estimation du gain sur le temps de carbonatation apporté par les produits (équation 10)

	Ref	AI	SC	AC
k_{acc} (mm/d ^{0.5})	0,79	0,50	0,44	0,27
(t_c^X/t_c^{NT})	1,0	2,5	3,2	8,6

Le gain sur le temps de carbonatation est estimé à 2,5 pour AI, 3,2 pour SC et un gain maximum de 8,56 pour AC. Après l'évaluation de l'efficacité des produits à court terme, leur durabilité a été étudié dans la partie suivante §3.7.

3.7 Durabilité des produits

La durabilité des produits colmateurs a été étudiée en menant des essais de vieillissement accéléré et en caractérisant ensuite la dégradation des produits et en évaluant leur perte de performance (diffusion gazeuse et carbonatation accélérée). La Figure 83 montre l'évolution de l'aspect visuel des échantillons des deux produits acryliques, AI et AC au cours du vieillissement accéléré.

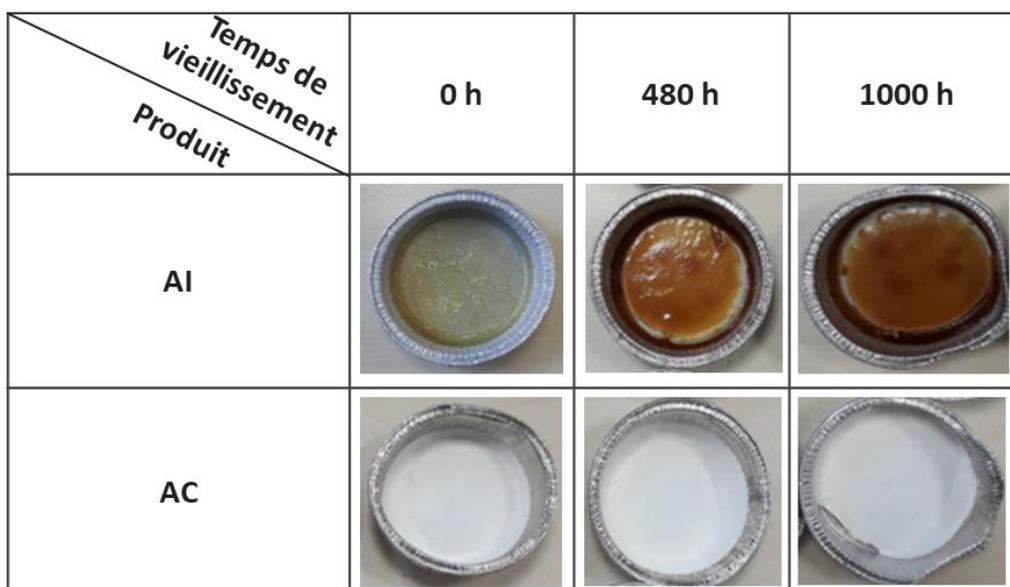


Figure 83 : Echantillons vieillis à différents temps de vieillissement

3.7.1 Caractérisation du vieillissement par spectroscopie ATR-FTIR

Les Figure 84 et Figure 85 présentent les spectres infrarouge obtenus par spectroscopie FTIR en mode ATR des deux produits, AI et AC, avant et après vieillissement.

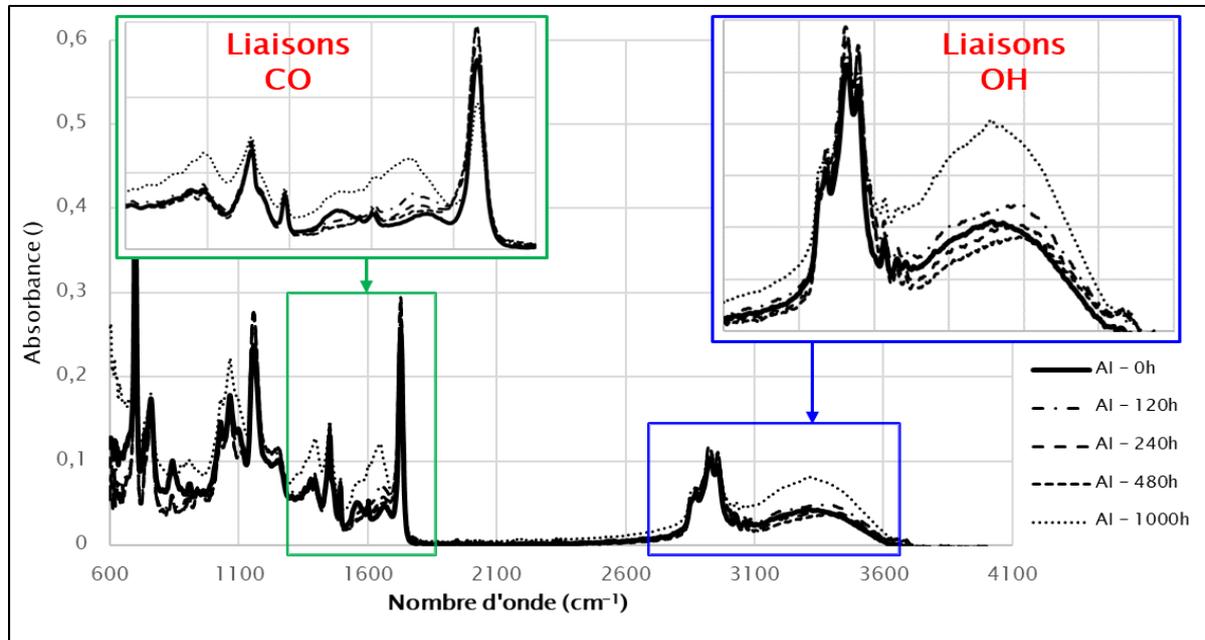


Figure 84 : Spectres FTIR des échantillons AI avant le vieillissement et après plusieurs durées de vieillissement

Les résultats de la Figure 84 montrent qu'il y a des modifications plus au moins importantes qui sont observées sur les spectres infrarouge des échantillons AI de $t=0h$ à $t = 480h$ de vieillissement. Cependant à $t = 1000h$, une augmentation de l'absorbance dans la zone spectrale des produits d'oxydation (liaisons CO et OH) est observée. Cela indique un vieillissement significatif de l'AI par oxydation.

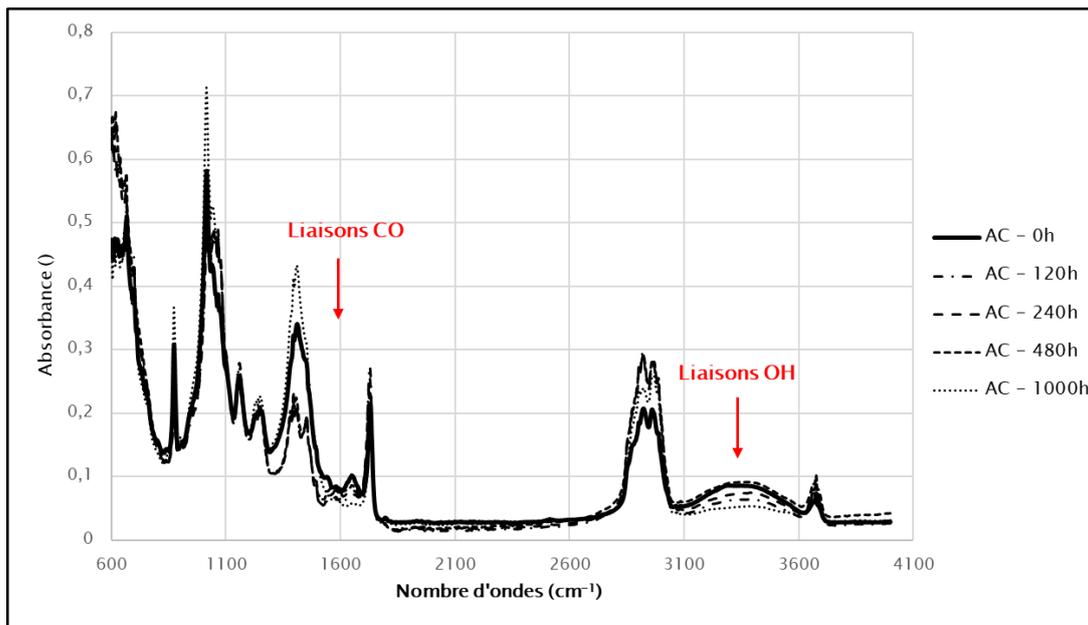


Figure 85 : Spectres FTIR des échantillons AC avant le vieillissement et après plusieurs durées de vieillissement

Les spectres FTIR-ATR de AC (Figure 85) montrent une grande variabilité entre les différents temps de vieillissement mais aucune tendance n'est observée. Néanmoins, il est possible d'affirmer la bonne résistance au vieillissement de ce produit puisque le principal indicateur de vieillissement qui est l'augmentation de la bande carbonyles (liaisons CO) et hydroxyle (liaisons OH) n'est pas observé dans les spectres de AC.

Les résultats de cette étude ont montré un vieillissement de AI et une bonne résistance de AC. Ces résultats donnent seulement une indication sur le vieillissement des deux produits acryliques. Ceci aidera dans l'interprétation des résultats de l'étude de durabilité.

3.7.2 Diffusion gaz

La (Figure 86) montre les résultats de la diffusion gazeuse après vieillissement. Deux fonctions ont été calibrées pour voir la tendance sur des périodes plus longues. Il s'agit d'une fonction logistique pour SC et AC :

$$\frac{D_{nc}^X(O_2)}{D_{nc}^{Ref}(O_2)} = \frac{C}{1+A\exp(-Bt)} \quad \text{Équation 63}$$

Avec les termes A, B et C de la fonction logistique.

Et une fonction polynomiale du quatrième degré pour AI :

$$\frac{D_{nc}^X(O_2)}{D_{nc}^{Ref}(O_2)} = E t^4 + F t^3 + G t^2 + H t + I \quad \text{Équation 64}$$

Avec E, F, G, H et I les termes de de la fonction polynomiale.

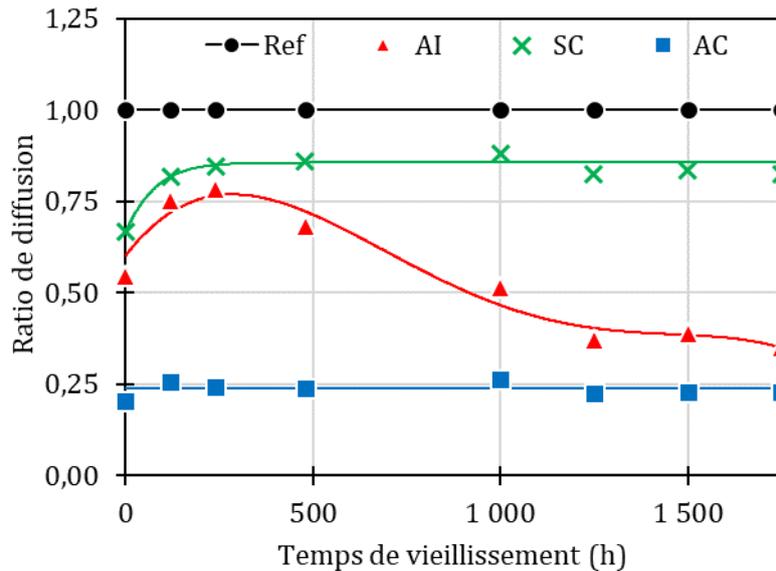


Figure 86 : Évolution du coefficient de diffusion en fonction du nombre d'heures de vieillissement

En examinant l'efficacité des produits après vieillissement, on observe que les résultats de l'étude (Figure 86) montrent une augmentation du coefficient de diffusion gazeuse des échantillons traités par SC après quelques centaines d'heures de vieillissement accéléré, mais qui se stabilise ensuite avec une efficacité non-nulle. Pour AC, il n'y a pas d'augmentation du coefficient de diffusion après 1750 heures. Quant à l'AI, après une forte augmentation du ratio pendant les premières centaines d'heures, une baisse très significative est observée. Cette baisse va en dessous de la réduction apportée par ce produit avant le vieillissement. Autrement dit, après une phase de dégradation, le vieillissement améliore significativement l'efficacité de ce produit et ce malgré sa dégradation observée avec la FTIR. Beushausen et al [130] ont également observé une tendance similaire après vieillissement sur différents produits acryliques.

3.7.3 Carbonatation accélérée

La (Figure 87) donne les épaisseurs carbonatées des échantillons traités par les différents produits vieillis avec différents temps et mis en carbonatation accélérée ensuite pendant 28 jours.

Les résultats (Figure 87) de l'étude de la carbonatation sur des échantillons vieillis confirment ce qui a été observé dans les sections précédentes (§3.7.1 et 3.7.2). En effet, le même comportement a été observé avec une forte augmentation de l'épaisseur carbonatée des échantillons traités AI et SC et une quasi-stabilité pour les échantillons traités par AC. Ces résultats sont conformes à ceux de Beushausen et al [130] et Li et al [158], qui ont observé une très bonne tenue au vieillissement de différents produits de revêtements.

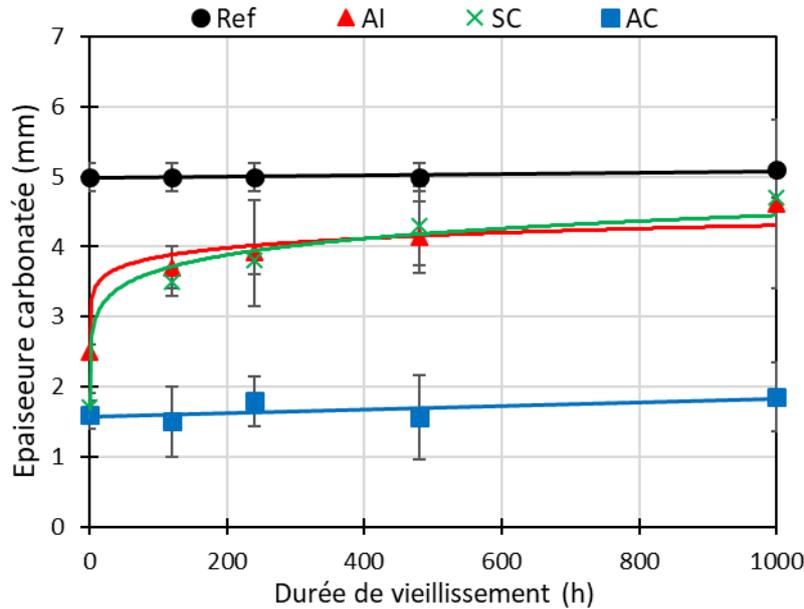


Figure 87 : Évolution de l'épaisseur carbonatée en fonction du nombre d'heure de vieillissement

On note l'impact de l'épaisseur du produit de revêtement sur sa tenue au vieillissement (§3.1). Ainsi, on note une très bonne résistance au vieillissement du AC. Alors qu'en ce qui concerne AI, une dégradation très importante due au vieillissement est constatée.

En ce qui concerne le SC, ce produit ne devrait pas se dégrader sous exposition aux UV, car il s'agit d'un produit à base de silane. Cette dégradation est probablement due aux cycles hydriques (condensation et pulvérisation) et à l'élévation de la température (jusqu'à 70 °C).

En comparant les coefficients de carbonatation estimés ($k_{\text{estimé}}$) avec les coefficients mesurés expérimentalement ($k_{\text{mesuré}}$) comme cela a été décrit dans la partie §3.6. Les résultats de la Figure 88 montrent qu'après vieillissement, la bonne corrélation entre la diffusion et les résultats de la carbonatation accélérée qui a été observée dans la partie §3.6 est toujours observée pour AC. Ce n'est pas le cas de AI pour lequel un écart entre le $k_{\text{estimé}}$ et le $k_{\text{mesuré}}$ est observé. Autrement dit, on constate des tendances différentes en diffusion et en carbonatation accélérée.

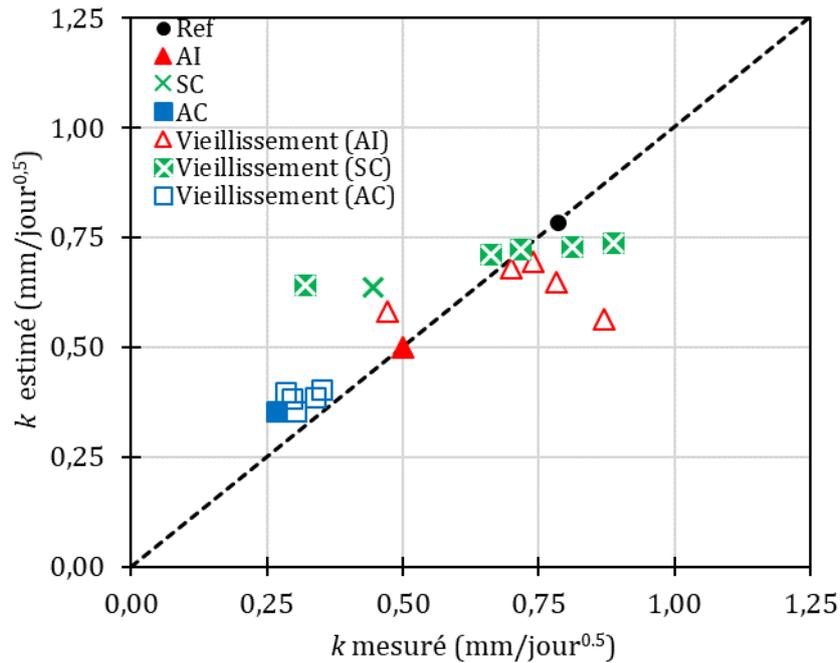


Figure 88 : Comparaison entre la diffusion gazeuse et la carbonatation accélérée avant et après vieillissement

3.8 Projections de durabilité

Les résultats de l'étude de vieillissement accéléré sont intéressants et donnent une indication sur la durabilité des produits colmateurs. Cependant, une projection sur le vieillissement dans des conditions naturelles (en années) est essentielle pour juger de l'intérêt de l'application des produits. Pour cela, une étude paramétrique a été réalisée en faisant varier la date d'application des produits et en regardant le gain sur le temps de carbonatation de l'enrobage sur les années qui suivent.

La corrélation entre le vieillissement accéléré et le vieillissement naturel est très difficile à établir. Dans cette étude, nous supposons, sur la base de certaines données et estimations trouvées dans la littérature [130], [158], que le facteur d'accélération est de 50 dans le l'enceinte de vieillissement QUV par rapport aux conditions de vieillissement naturel (Equation 13).

Il est à noter que pour AI, les projections ont été faite en ne prenant pas en compte l'amélioration observée de son efficacité après quelques centaines d'heures de vieillissement. La partie qui a été prise en compte est uniquement la première phase durant laquelle une forte dégradation a été observée.

Le vieillissement des produits est décrit par la fonction suivante :

$$\frac{D_{nc}^X(O_2)}{D_{nc}^{Ref}(O_2)} = \frac{C}{1 + A \exp\left(-\frac{Bt}{50}\right)} \quad \text{Équation 65}$$

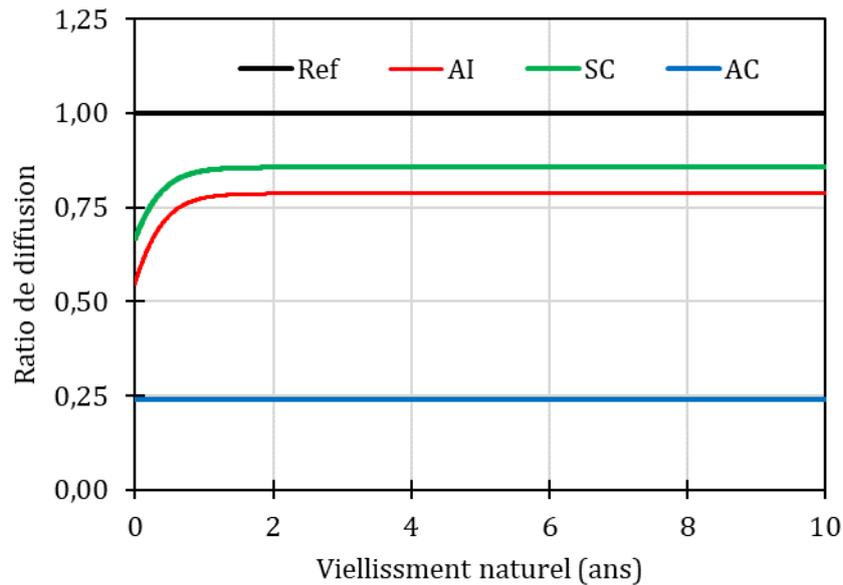


Figure 89 : Evolution du coefficient de diffusion en fonction du vieillissement naturel

La Figure 89 donne une projection de l'efficacité des produits dans le temps. Cette projection montre l'excellente résistance au vieillissement de AC, qui reste pleinement efficace après plusieurs années. Ce qui n'est pas le cas des deux autres produits (AI et SC) qui se dégradent très rapidement jusqu'à atteindre un plateau et conservent donc une efficacité faible. Ceci est probablement dû à la présence de fragments de produits après dégradation qui ralentissent la diffusion gaz.

L'estimation de la vitesse de carbonatation a été faite sur la base des variations des coefficients de diffusion. Ensuite, il est intéressant d'évaluer l'évolution de la profondeur de carbonatation dans un enrobage en béton. Pour cela, l'approche itérative est utilisée comme suit :

$$x(t) = \int_0^t dx = \int_0^t \left(\frac{k_{\text{Ref}}^{\text{acc}}}{10} \right) \sqrt{\frac{D_{\text{nc}}^x(\text{O}_2)}{D_{\text{nc}}^{\text{Ref}}(\text{O}_2) 2\sqrt{t}}} dt \quad \text{Équation 66}$$

Dans cette partie, différents scénarios d'application ont été imaginés afin d'étudier l'intérêt d'appliquer les produits en préventif sur des ouvrages neufs mais également sur des ouvrages existants de 10, 20 ou 40 ans comme c'est le cas des TAR. La Figure 90 présente les résultats d'une étude paramétrique sur l'effet de la date d'application des produits (entre 0 et 40 ans) sur la vitesse de carbonatation sur les années suivantes.

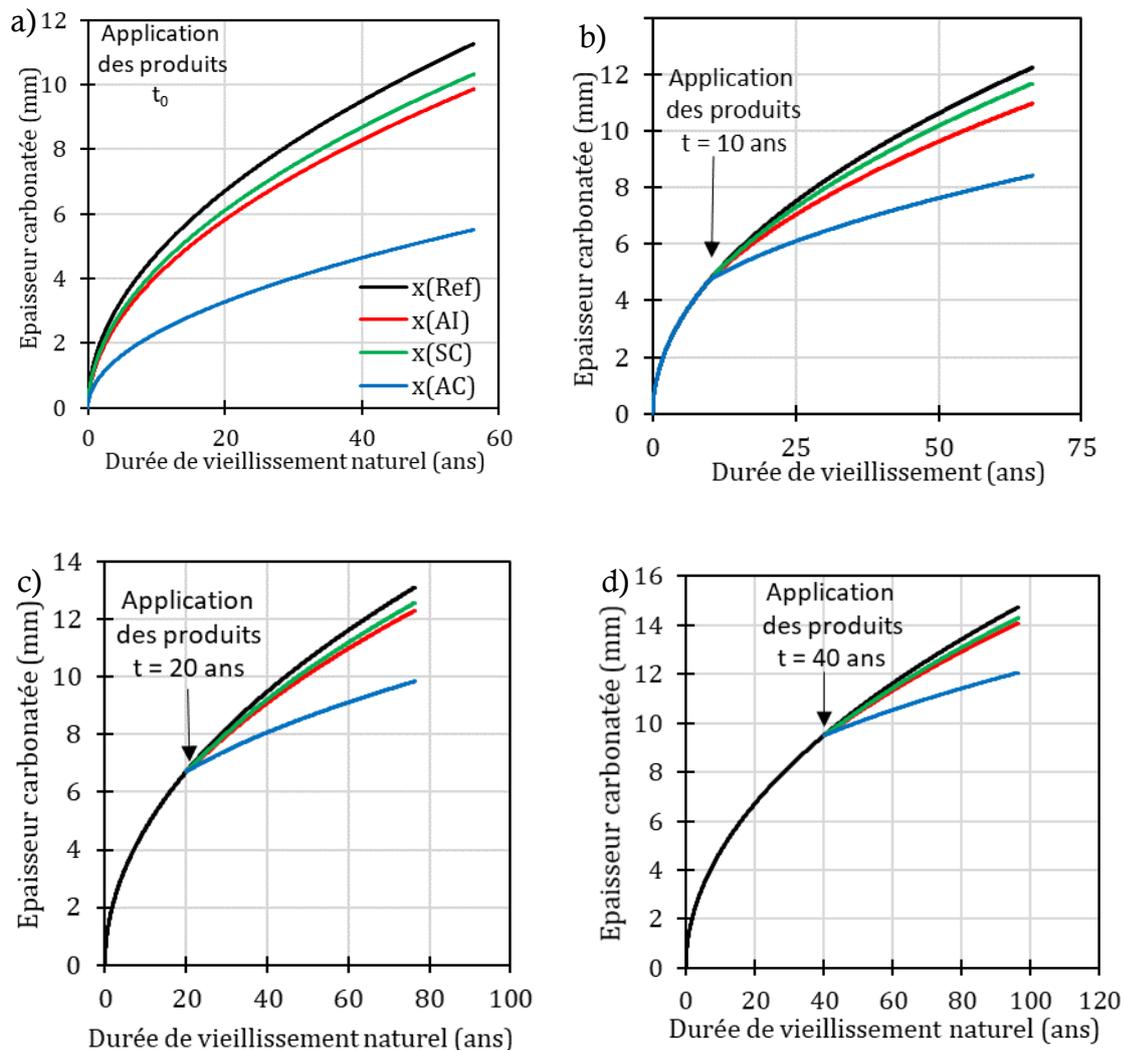


Figure 90 : Estimation comparative du temps de carbonatation d'un enrobage de béton lorsque les différents produits sont appliqués : a) sur une nouvelle construction ; b),c),d) respectivement 10, 20 et 40 ans après la construction

Tous ces scénarios montrent qu'un seul produit se démarque, il s'agit du AC avec un gain de temps très important sur la profondeur carbonatée des enrobages en béton des ouvrages neufs avec une profondeur réduite de moitié 60 ans après son application. Les réductions sont beaucoup moins importantes lorsque ce produit est appliqué après quelques décennies. Les deux autres produits, AI et SC conduisent à un léger gain de temps sur la profondeur carbonatée mais n'ont pratiquement aucun effet lorsqu'ils sont appliqués sur des structures qui sont vieilles de dix ans ou plus.

4. Influence des fissures

Dans la littérature, les études sur l'efficacité des produits de protection des surfaces en béton ont porté sur des échantillons non-fissurés. Cependant, les parements des structures en béton sont très souvent fissurés. C'est pourquoi, une étude sur les matériaux pré-fissurés a été réalisée.

4.1 Diffusion gaz

4.1.1 Fissuration des échantillons annulaires

Les essais de fissuration des anneaux par le biais du dispositif « cœur expansif » ont permis l'obtention de 4 à 7 fissures par échantillon (6 échantillons au total) en appliquant une charge de 12 kN avec des ouvertures résiduelles allant jusqu'à 720 μm et des ouvertures sous chargement allant jusqu'à 1 mm (Tableau 11). Ces mesures d'ouvertures de fissures ont été obtenues en utilisant un logiciel d'analyse d'images : ImageJ avec une résolution de $\approx 42,0$ pixels/mm.

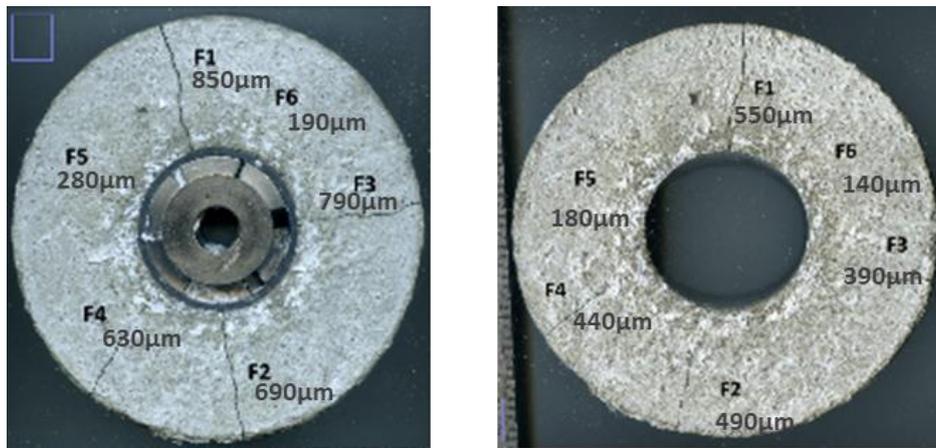


Figure 91 : Exemple de l'état de fissuration d'un échantillon annulaire avec et sans chargement : E1

Après la fissuration, les échantillons ont été traités par les trois produits (2 échantillons par produits). Des essais de diffusion ont été réalisés sur chaque échantillon selon le scénario suivant (Figure 92):

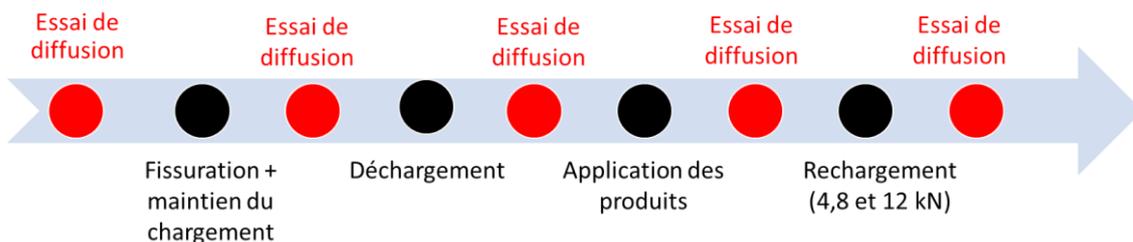


Figure 92 : Scénario de l'étude

CHAPITRE III : IMPACT DES PRODUITS COLMATEURS SUR LES PHENOMENES DE TRANSPORT ET DE LA CARBONATATION

Tableau 11 : Etat de fissuration (nombre et ouvertures) des échantillons annulaires

Numéro d'échantillon	Nombre de fissures	Ouverture maximale des fissures (μm)							Somme des ouvertures maximales (μm)
		F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	-
E1 chargé*	6	850	690	790	630	280	190	-	3430
E1 déchargé**	6	550	490	390	440	180	140	-	2190
E2 chargé	5	310	230	290	650	380	-	-	1860
E2 déchargé	5	210	140	180	520	290	-	-	1340
E3 chargé	5	610	710	380	300	330	-	-	2330
E3 déchargé	5	390	530	270	110	250	-	-	1550
E4 chargé	7	600	390	350	830	300	230	250	2700
E4 déchargé	7	530	120	190	590	640	60	110	2130
E5 chargé	6	700	380	350	320	270	250	-	2270
E5 déchargé	6	540	130	110	120	90	130	-	1120
E6 chargé	4	460	1000	930	420	-	-	-	2810
E6 déchargé	4	190	720	260	210	-	-	-	1380

* Chargé: échantillon avec le dispositif « cœur expansif »

** Déchargé: échantillon sur lequel le dispositif cœur expansif a été enlevé après sa fissuration

4.1.2 Effet de la fissuration et du chargement mécanique sur l'efficacité des produits

La Figure 93 montre l'évolution de la diffusion en fonction de l'état de fissuration des échantillons non traités. Une certaine corrélation entre l'état de fissuration de l'échantillon et le coefficient de diffusion de O_2 est observée avec un coefficient de diffusion qui augmente avec le nombre et les ouvertures de fissures.

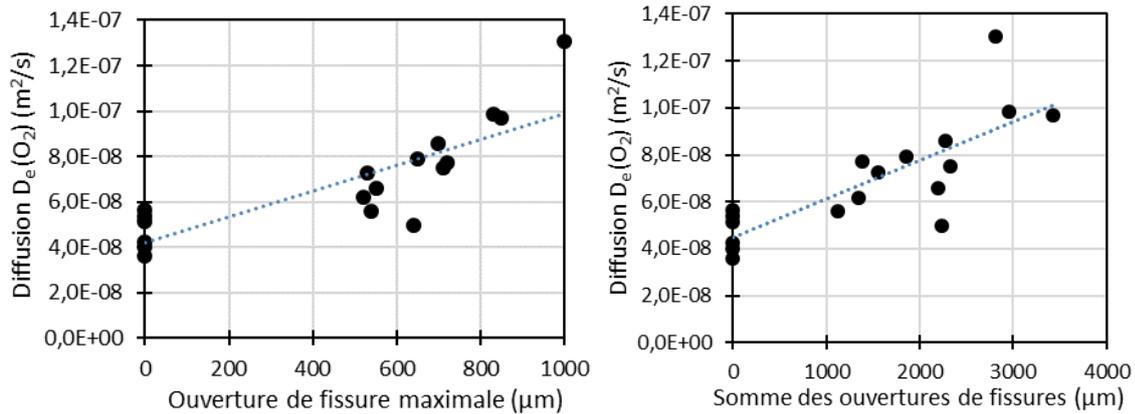


Figure 93 : Effet de la fissuration sur la diffusion de O_2

La Figure 94 donne les ratios de diffusion des 3 produits. SC à un ratio très proche de 1, ce qui signifie que ce produit n'a aucune efficacité vis-à-vis de la diffusion gazeuse dans les matériaux fissurés. En ce qui concerne les deux autres produits, AI a un ratio de 0,86 et AC un ratio de 0,75 ce qui signifie que leur efficacité est limitée et qu'ils colmatent une petite partie des fissures.

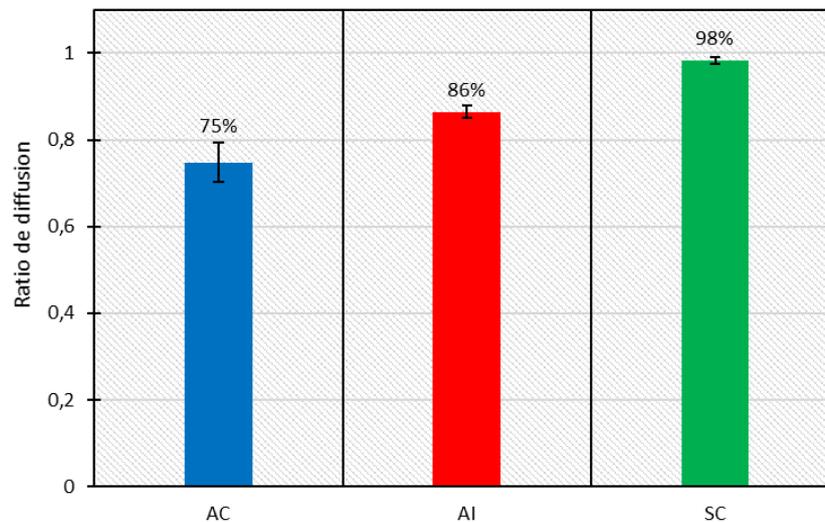


Figure 94 : Ratio de diffusion dans les échantillons fissurés

En comparant ces résultats avec ceux obtenus sur les échantillons non fissurés (Figure 95), une grande différence en termes de réduction du coefficient de diffusion est à noter. Cette différence est plus marquée pour AC, avec un ratio de 0,23 pour un matériau non fissuré qui est multiplié par trois dans le cas d'un matériau fissuré.

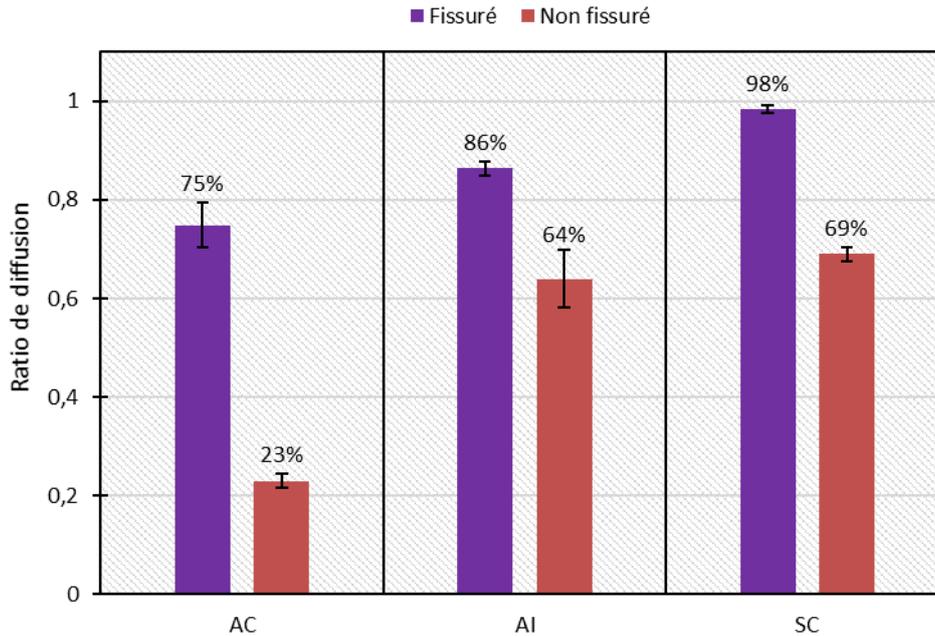


Figure 95 : Comparaison des ratios de diffusion dans les échantillons fissurés et non fissurés

La résistance des produits aux chargements mécaniques est un facteur déterminant quant à leur efficacité à long terme. Car les TAR subissent des chargements thermo-hydriques et sollicitations dues à l'effet du vent et du tassement différentiel. Pour évaluer cette résistance, les échantillons annulaires fissurés et traités par les trois produits ont subi par la suite 3 chargements de 4, 8 et 12 kN, des essais de diffusion ont été ensuite réalisés après chaque rechargement. Chaque point sur la Figure 96 est une moyenne faite sur deux échantillons. Les résultats montrent une très bonne résistance de AC avec un ratio de diffusion qui reste inférieur à 1 (efficacité faible) après un rechargement de 8 kN. Cependant avec un rechargement de 12 kN, le ratio de diffusion devient supérieur à 1.

En ce qui concerne AI, le ratio augmente fortement pour devenir supérieur à 1 dès le premier rechargement à 4kN. Et enfin pour SC, le produit n'apporte aucune efficacité sur matériau fissuré et donc le ratio de diffusion de l'échantillon traité par ce produit augmente fortement avec le chargement et dépasse 3 avec un rechargement de 12 kN.

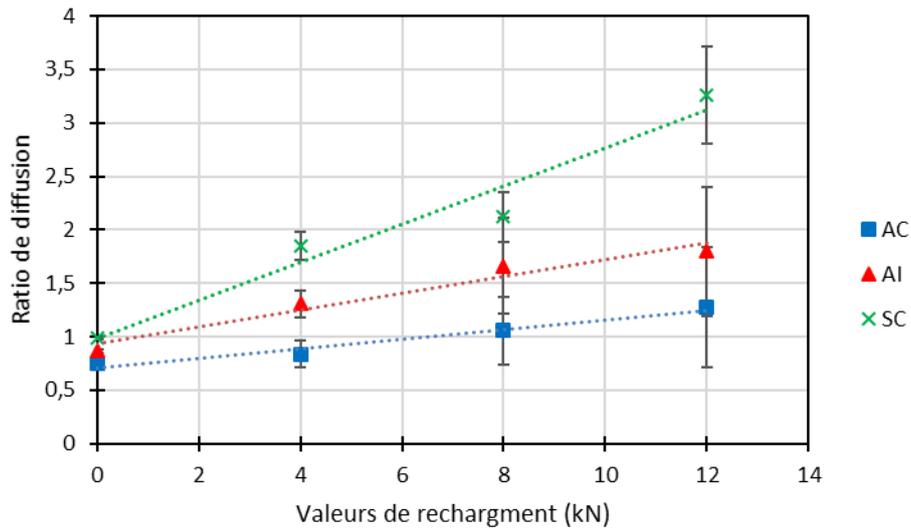


Figure 96 : Evolution du ratio de diffusion en fonction du rechargement mécanique

4.2 Carbonatation accélérée

Cette étude de carbonatation accélérée a été menée sur des prismes pré-fissurés avec deux valeurs d'ouverture résiduelle (100 μm et 500 μm) et traités par la suite par les différents produits avant d'être mis en carbonatation accélérée pour des durées d'exposition de 30 et 90 jours.

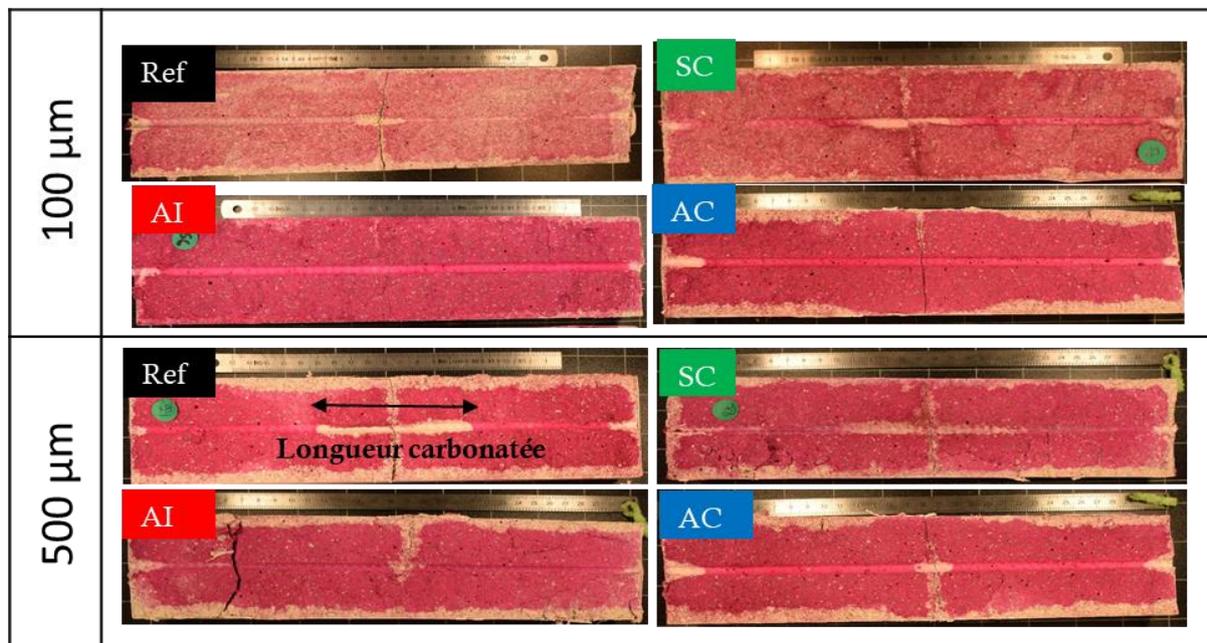


Figure 97 : Longueurs carbonatées à l'interface acier/mortier à échéance de 90 jours de carbonatation accélérée

Les résultats (Figure 97 et Figure 98) montrent que la SC ne permet pas d'éviter la carbonatation de l'interface acier/mortier au voisinage de la fissure, même pour des ouvertures de fissures de 100 μm . En effet, ce produit n'a pas la capacité de colmater les fissures de cette gamme d'ouverture. En ce qui concerne les autres produits, AI et AC semblent être capables de colmater partiellement ou complètement les fissures avec une ouverture comprise entre 100 μm et 500 μm , car la longueur carbonatée dans l'interface acier/mortier (CL) est fortement réduite par l'application de ces deux produits. En effet, pour une ouverture de fissure de 100 μm , la longueur carbonatée dans les prismes traités avec ces deux produits est inférieure à 1 cm à 90 jours alors que celle mesurée dans les prismes non traités est d'environ 6,5 cm. La même tendance est observée pour une ouverture de fissure de 500 μm , la longueur carbonatée des prismes traités avec AI et AC est d'environ 2 cm à 90 jours alors que celle mesurée dans les prismes non traités est d'environ 9 cm.

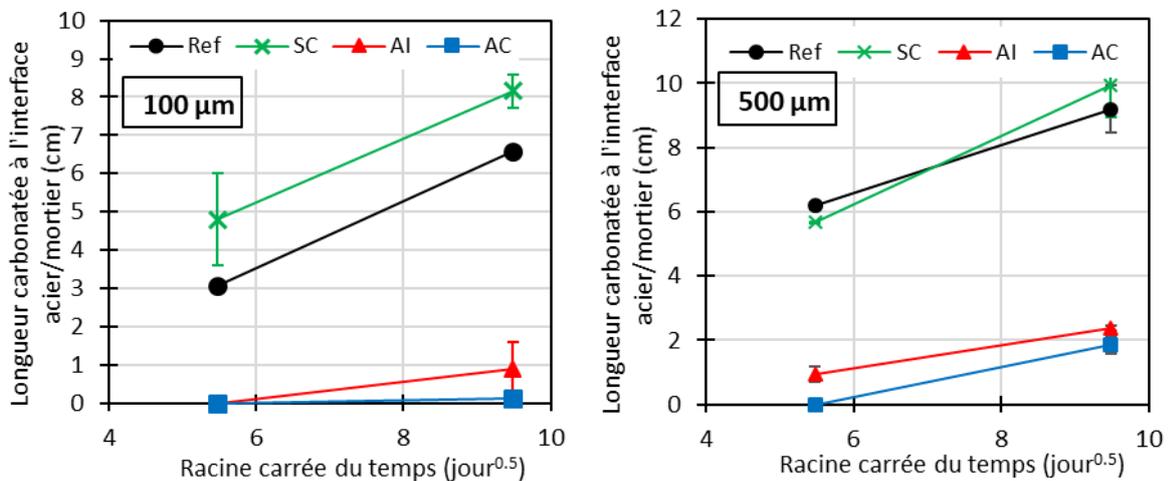


Figure 98 : Longueur de carbonatation à l'interface acier/mortier par rapport à la racine carrée du temps : (a) ouverture de la fissure de 100 μm ; (b) ouverture de la fissure de 500 μm

5. Comparaison des produits

Dans cette partie, La comparaison entre les produits est présentée sous forme de diagramme radar qui résume les aspects étudiés dans ce chapitre en quatre indicateurs (Figure 99):

- Diffusion
- Résistance à la carbonatation
- Tenue au vieillissement
- Efficacité sur matériau fissuré

Ces indicateurs ont été calculés comme indiqué dans le Tableau 12. L'efficacité du produit augmente avec la surface colorée.

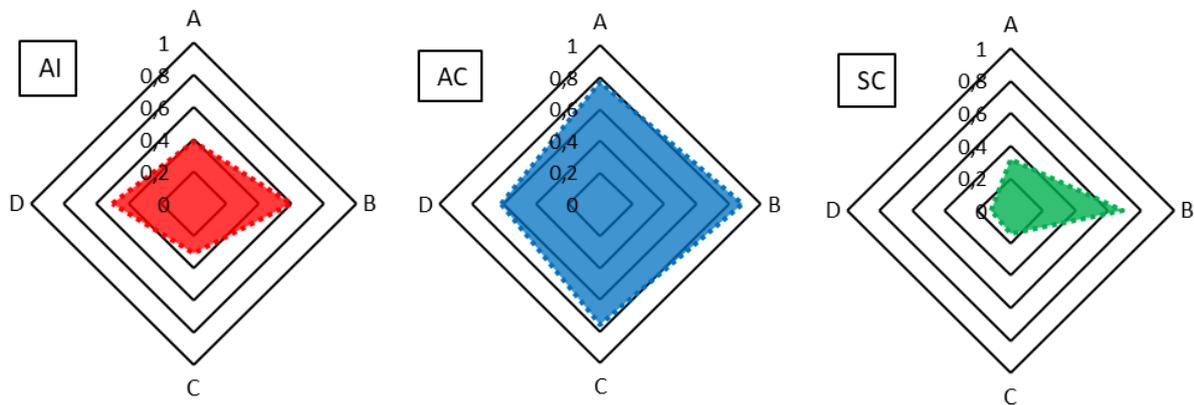


Figure 99 : Diagramme radar résumant l'efficacité des produits de protection sur les mortiers

Tableau 12 : Calcul des indicateurs

Indicateur		Calcul
Diffusion	A	= (1- ratio de diffusion)
Résistance à la carbonation	B	= $(1 - (t_c^{NT} / t_c^X))$
Tenue au vieillissement	C	= (1- ratio de diffusion) à t= 240 h de vieillissement (correspond à la dégradation maximale des produits)
Efficacité sur matériau fissuré	D	= $\frac{(1 - (\frac{Lc(X)}{Lc(Ref)})) + (1 - \text{ratio de diffusion du matériau fissuré})}{2}$

Avec : ratio de diffusion = $De(O_2)$ traité sur une face / non traité ; $Lc(X)$ = longueur carbonatée à l'interface acier/mortier dans les échantillons traités par le produit X à échéance de 90 jours ; $Lc(Ref)$ = longueur carbonatée à l'interface acier/mortier dans les échantillons non traités par le produit X à échéance de 90 jours et ratio de diffusion du matériau fissuré = $De(O_2)$ de l'échantillon fissuré/ non fissuré).

Dans cette étude, l'efficacité d'un produit en particulier a été démontrée, à savoir le revêtement acrylique (AC). En effet, ce produit a montré son efficacité sur des matériaux non fissurés et sa capacité à colmater au moins partiellement des fissures avec une ouverture de quelques centaines de μm . Ce produit a également montré sa bonne résistance au vieillissement, contrairement aux deux autres produits. Comme on peut le voir sur la Figure 99 qui résume l'efficacité des produits dans les différentes conditions de cette étude.

6. Conclusion

Cette étude a permis de comparer l'efficacité de trois produits de protection de surface du béton. Un produit se démarque, le revêtement acrylique (AC). Il est important de rappeler que l'efficacité du produit vis-à-vis du transport gazeux et de la carbonatation est conditionnée par plusieurs paramètres. Les plus importants sont :

- L'application a été faite sur du mortier nouvellement fabriqué, sur lequel nous avons vu que l'application d'un produit comme AC semble adéquate avec une grande efficacité immédiate, une grande durabilité. En d'autres termes, les projections de durabilité ont montré que l'application du produit sur de nouvelles structures permet un gain de temps très important sur la profondeur carbonatée de l'enrobage du béton. En revanche, si on l'applique après une dizaine d'années, il a beaucoup moins d'impact sur la cinétique de carbonatation de l'enrobage et donc la question de l'intérêt d'appliquer le produit sur des structures qui ont quelques dizaines d'années se pose.
- Le produit a montré sa capacité à colmater des fissures de quelques centaines de μm mais ne serait probablement pas capable de colmater des fissures avec une ouverture plus grande ($> 1 \text{ mm}$). Pour cette raison, une analyse détaillée du réseau de fissures de la structure est nécessaire avant toute application du produit, car les fissures sont présentes presque systématiquement sur toute surface des structures en béton et constituent la voie privilégiée de pénétration du CO_2 dans le béton.

Il est important de noter que ces conclusions ont été faites uniquement sur le gain de temps apporté par l'application des produits sur la carbonation de l'enrobage. Dans le chapitre suivant, nous allons nous placer dans le cas où la corrosion a été initiée et/ou l'enrobage a été totalement carbonaté, afin d'évaluer l'apport de l'application des produits colmateurs vis-à-vis de la cinétique de corrosion.