

Élève de l'ENS Paris-Saclay, Catherine Pons, lors de sa première année en Sciences pour l'Ingénieur (année SAPHIRE) a suivi le parcours « Ingénierie civile ». Dans ce cadre les élèves ont, sur un thème imposé, à réaliser un état de l'art, un mémoire et à présenter une courte leçon. Cette ressource est issue de ce dossier.

Les fissures dans les ouvrages en béton sont récurrentes, notamment de par la faible résistance du béton en traction, or durant la mise en œuvre et la vie de la structure, différentes sollicitations amènent le béton à travailler en traction. Pour des raisons techniques et esthétiques, il faut veiller à limiter l'ouverture des fissures. L'auto-cicatrisation est donc un enjeu pour la durabilité, l'esthétique et la sécurité des ouvrages en béton. Cette auto-cicatrisation est tout d'abord naturelle et résulte de la composition même du béton, mais elle peut également être favorisée par des ajouts de champignons, de bactéries ou encore de polymères super absorbants.

Cette ressource présente la capacité du béton à s'auto-régénérer, ainsi que quelques méthodes existantes ou en cours d'études permettant d'accélérer ce phénomène d'auto-cicatrisation.

1 - La fissuration du béton

1.1 - Causes

Les processus de fissuration du béton peuvent intervenir à n'importe quelle période de la vie d'un ouvrage. Les fissures dans le béton sont souvent provoquées par une variation de volume due à des réactions chimiques, des variations de température ou encore à l'évaporation de l'eau. Elles sont également initiées par des chargements extérieurs qui peuvent être à l'origine de déformations instantanées mais également de déformations différées comme le fluage¹ [1].

a) Fissuration causée par variation de volume

Les variations de volumes sont souvent causées par des retraits. L'origine de ces retraits peut être variée (réactions chimiques et phénomènes induits, variations de température, évaporation de l'eau). On peut définir quatre types de retraits qui se développent à différentes périodes de la vie du béton [2] :

1- Le retrait de dessiccation ou de séchage est le plus important, c'est celui qui conduit le plus souvent à la fissuration. Ce retrait est dû à l'évaporation du surplus d'eau ajouté lors de conception du béton, et en particulier de l'eau contenue dans la porosité du béton. Par exemple, on retrouve régulièrement ce type de retrait au niveau des structures avec une grande surface en contact avec l'air extérieur qui est à un degré d'humidité plus faible que l'intérieur du béton. La fissuration apparaît donc principalement en surface, comme on peut le voir sur la figure 1.

¹ Le fluage du béton représente une part des déformations différées due à un chargement mécanique constant dans le temps.



Figure 1 : Fissuration d'une dalle en béton à cause d'un retrait de dessiccation [3]

2- Le retrait plastique, qui apparaît avant le retrait de dessiccation, est également provoqué par l'évaporation de l'eau en contact avec l'air extérieur alors que le béton est encore dans son état plastique.

3- Le retrait d'auto-dessiccation ou endogène (également appelé contraction de Le Chatelier) est initié par des réactions chimiques consommant l'eau présente dans le béton et laissant dans la matrice des vides remplis de vapeur d'eau à l'origine du retrait. Il se développe dans toute la masse du béton.

4- La réaction d'hydratation du béton étant exothermique, elle conduit à une augmentation de température avant la prise du béton. À la fin de la prise, la température à l'intérieur du béton diminue, entraînant des contractions thermiques et des déformations bloquées à l'intérieur de l'élément en béton. L'apparition de fissures peut alors être une conséquence de ces déformations empêchées.

b) Fissuration suite à des chargements

Résistant en compression le béton est très peu résistant en traction. Ainsi une structure en béton soumise à des contraintes de traction risque de fissurer. Ces contraintes peuvent être la conséquence de sollicitations instantanées en compression, traction ou flexion, mais également de sollicitations continues conduisant à des phénomènes tels que le fluage.

1.2 - Conséquences

La première conséquence de la fissuration des structures en béton est l'esthétique. Les conséquences plus contraignantes sont tout d'abord mécaniques. En effet, les fissures peuvent diminuer la résistance mécanique d'un ouvrage ou d'un élément. De plus, dans les structures en béton armé, les armatures sont protégées de la corrosion par le phénomène de passivation. Cependant, si la fissuration du béton permet à l'eau du milieu extérieur d'atteindre les armatures, le pH diminue et la protection des armatures disparaît. Ceci entraîne donc une diminution des performances mécaniques encore plus importante et l'ouvrage peut être fortement fragilisé. Finalement, la fissuration peut être à l'origine de problèmes d'étanchéité, ce qui est préoccupant pour des ouvrages tels que les centrales nucléaires.

Le développement d'une fissuration trop importante nécessite donc d'intervenir et les coûts de maintenance ou de réparation peuvent être élevés.

Comme la fissuration peut intervenir à tout moment dans la vie d'un ouvrage, il est donc crucial de mettre en place des solutions adaptées pour minimiser les risques de fissuration et assurer la durabilité et la sécurité des structures en béton armé. L'auto-cicatrisation est un des moyens pour lutter contre le phénomène de fissuration.

2 - L'auto-cicatrisation naturelle

2.1 - Le béton romain

Un des secrets de la longévité du béton romain est sa capacité à se cicatrifier. Les scientifiques ont longtemps pensé que l'origine de cette cicatrisation était due à la présence de poudres volcaniques. En effet, en présence de l'eau, la poudre volcanique réagit et forme des agrégats.

Récemment, il a été montré que la cicatrisation mécanique du béton était en réalité permise par la présence de clastes de chaux (CaO non hydratés) avant la fissuration [4]. Le béton romain est composé de sable, d'eau, de poudres volcaniques, d'équivalents d'agrégats et de chaux vive. C'est l'utilisation de la chaux vive qui permet la formation de clastes de chaux dans le béton comme présenté sur la figure 2.

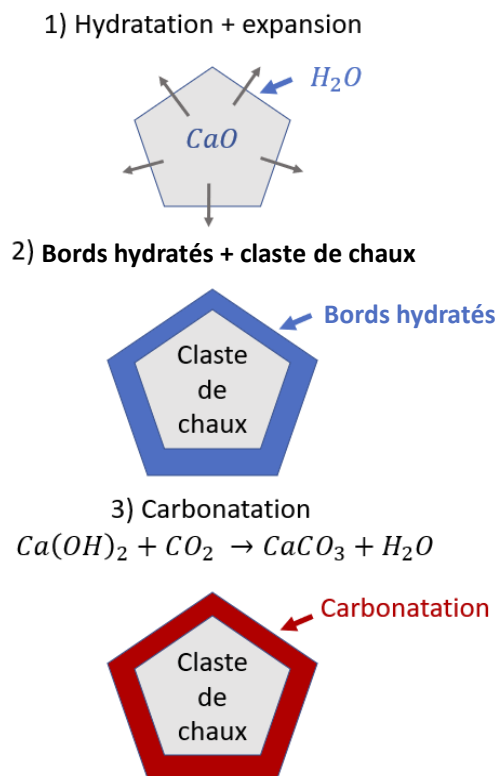


Figure 2 : Schéma de la réaction de la chaux vive dans le béton

Après hydratation de la fissure les clastes réagissent pour former du carbonate de calcium et ainsi cicatrifier la fissure. On peut observer ce processus sur la figure 3.

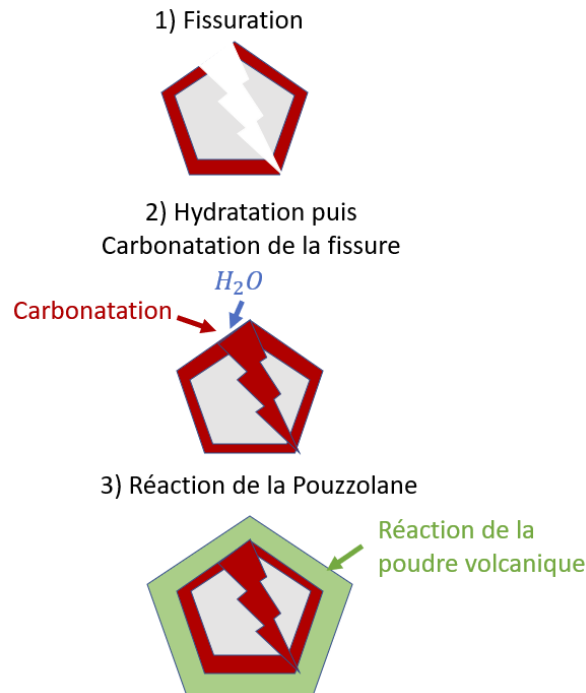


Figure 3 : Schéma de l'auto-cicatrisation du béton romain

L'auto-cicatrisation du béton romain est donc permise par l'hydratation de clastes de chaux qui provoque sa carbonatation. La cicatrisation est également renforcée par la réaction de la Pouzzolane² avec l'eau.

2.2 - Le béton moderne

Le béton communément utilisé n'est pas composé de chaux, mais de ciment. Ce béton est lui aussi capable de s'auto-cicatriser. On utilise également de plus en plus de laitier pour diminuer l'impact environnemental du ciment. Or celui-ci contient de la chaux et ainsi favorise l'auto-cicatrisation du béton.

a) Auto-cicatrisation de béton cimentaire

Phénomène de cicatrisation

Le béton cimentaire cicatrise en présence d'eau. Deux hypothèses sur la réaction chimique à l'origine de la cicatrisation sont proposées [1] : l'hydratation du clinker³ anhydre et la précipitation de carbonate de calcium. Pour la précipitation de carbonate de calcium, la présence de dioxyde de carbone est nécessaire alors que l'eau est suffisante pour l'hydratation du clinker. Cette réaction chimique entraîne la création de nouveaux cristaux qui permettent de refermer la fissure. La deuxième hypothèse est la présence de débris.

Pour valider ou non ces différentes hypothèses, Hearn [5] réalisa des expériences sur la perméabilité du béton fissuré. Dans ses expériences, il considéra du ciment contenant 25% de clinker anhydre. Après la fissuration, le béton est hydraté. Puis, après l'hydratation la perméabilité du béton est mesurée. Cette dernière apparaît beaucoup plus faible qu'avant l'hydratation, ce qui met en lumière le phénomène de cicatrisation et son effet sur la perméabilité. De plus, Hearn a réalisé le même essai en remplaçant l'eau par du propan-2-ol. Dans ce cas, le béton reste perméable. Ceci démontre que c'est bien la précipitation, permise par l'eau, de carbonate de

² La pouzzolane est une roche constituée de scories volcaniques basaltiques, c'est une structure alvéolaire.

³ Le clinker est un des constituants du ciment, obtenu par calcination de calcaire et d'argile.

calcium qui est à l'origine de la cicatrisation du béton. En revanche, ce n'est pas la présence de débris qui est à l'origine de l'auto-cicatrisation du béton, sinon le propan-2-ol, qui a la même viscosité que l'eau, aurait également permis la cicatrisation. En effet, à viscosité égale le propan-2-ol aurait, tout comme l'eau, pu déplacer les débris pour permettre la cicatrisation.

Plus tard, des tests au rayon X confirmeront également les résultats obtenus par Hearn.

Propriétés du béton cicatrisé

En ce qui concerne les caractéristiques mécaniques du béton cicatrisé, de nombreuses études existent dans la littérature (ex : [6]) et une synthèse des résultats est proposée sur la figure 4.

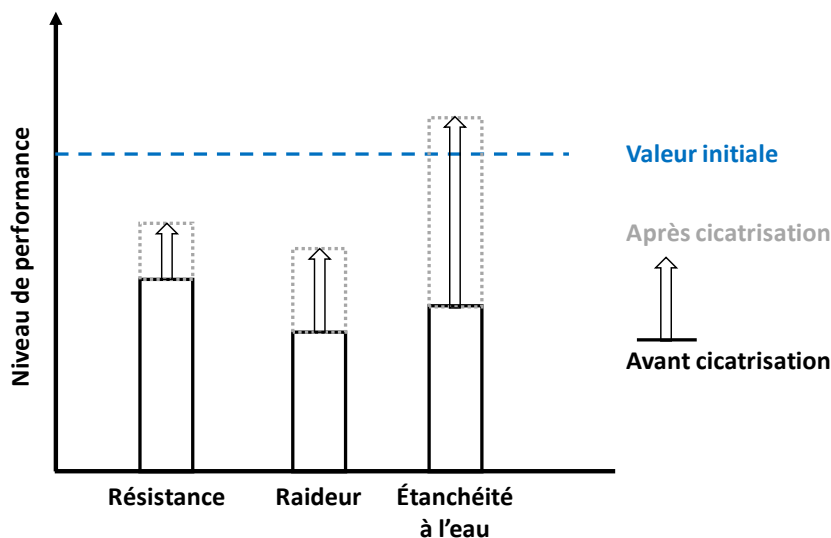


Figure 4 : Le regain de performance des propriétés mécaniques et de transfert (inspiré de [1])

Sur cette figure on peut voir que la cicatrisation du béton a permis un réel regain de résistance et de raideur par rapport à la fissuration. Toutefois, ces performances restent inférieures à celles avant fissuration. Cependant, des études ont montré que si on laissait des éprouvettes fissurées dans l'eau, la raideur pouvait continuer d'augmenter jusqu'à tendre vers les propriétés avant fissuration. De plus, l'auto-cicatrisation a permis de rétablir l'étanchéité à l'eau de la fissure, étanchéité plus importante après cicatrisation qu'avant fissuration. Ce regain des caractéristiques mécaniques et de transfert du béton permet de prolonger l'espérance de vie du matériau comme explicité sur la figure 5.

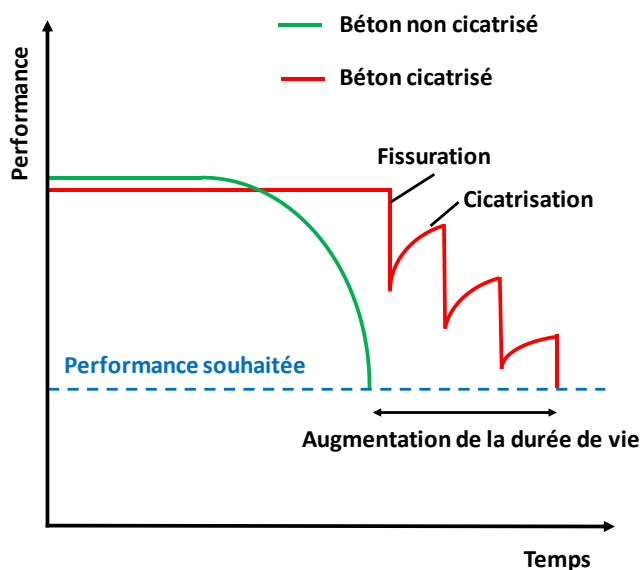


Figure 5 : Allongement de la durée de vie par cicatrisation (inspiré de [1])

Le béton cimentaire auto-cicatrise par précipitation du carbonate de calcium suite à une hydratation. La cicatrisation permet au béton de regagner des caractéristiques mécaniques proches des caractéristiques initiales, ainsi l'auto-cicatrisation du béton permet de rallonger sa durée de vie.

b) Auto-cicatrisation du béton contenant du laitier

Le laitier⁴ est de plus en plus utilisé à des fins écologiques pour réduire la proportion de ciment portland. Le laitier présente un impact carbone plus faible que le ciment et il est impacté différemment par les phénomènes de retraits entraînant sa fissuration [7].

Pour ses expériences, Oliver [7] utilise deux méthodes expérimentales pour suivre l'évolution de fissures et donc l'auto-cicatrisation. Dans sa première expérience, elle utilise la tomographie⁵ à rayons X pour suivre l'évolution de la fissuration. Cette technique de suivi a l'avantage d'être non destructive et de permettre une analyse 3D de la fissure. Dans cette expérience, les éprouvettes contiennent plus ou moins de laitier de haut fourneau. Les éprouvettes sont, tout d'abord, fissurées par deux méthodes différentes. La première est le fendage, les éprouvettes sont alors conservées en un seul bloc grâce à une résine. Dans ce cas, après la fissuration, les éprouvettes sont scannées par tomographie puis placées dans de l'eau pour permettre leur cicatrisation. Les éprouvettes sont ensuite scannées à intervalles de temps réguliers pour observer l'évolution de la cicatrisation. La deuxième méthode utilisée est la méthode du cœur expansif (figure 6) [8].

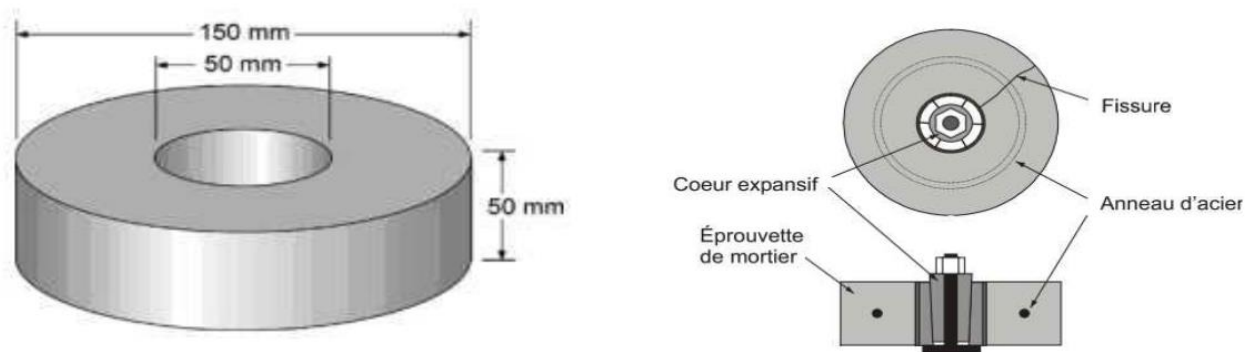


Figure 6 : Méthode du cœur expansif [8]

Cette fois-ci, les éprouvettes, avec différentes quantités de laitier, présentent un trou central. Un cœur expansif en acier est placé au milieu, provoquant l'apparition de fissures radiales. Ensuite, les échantillons sont placés dans l'eau pour cicatriser et le suivi de l'évolution de la fissuration est réalisé par mesure de débit d'air à travers les fissures.

Dans les deux expériences, différentes tailles de fissures et différentes compositions (plus ou moins de laitier) ont été testées. Ces expériences révèlent que le laitier de haut fourneau présente de meilleures prédispositions à l'auto-cicatrisation que le ciment de Portland. En effet, le laitier de haut fourneau a une cinétique de cicatrisation plus importante. De plus, à long terme on observe un meilleur colmatage des fissures grâce à la présence d'une grande quantité de laitier et de ciment anhydre. Deux critères permettant de quantifier l'auto-cicatrisation émergent : on a d'une part la cinétique d'hydratation du matériau qui est deux fois plus importante avec l'utilisation de laitier

⁴ Le laitier est un co-produit des hauts fourneaux au cours de la fabrication du métal par voie liquide.

⁵ Voir « La tomographie en sciences et mécanique des matériaux », F. Hild, H. Horsin Molinaro, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-cachan/ressources_pedagogiques/la-tomographie-en-sciences-et-mecanique-des-materiaux

et la finesse du matériau. De plus, cette expérience relève une fois de plus l'importance de l'hydratation dans le processus d'auto-cicatrisation [8].

Le laitier est donc un matériau recyclé qui favorise l'auto-cicatrisation. Seulement celui-ci est particulièrement fragile au jeune âge et peut facilement se fissurer à cause du retrait. Pour le regain en raideur, Olivier [8] a tracé la contrainte appliquée en fonction de la déformation pour différents échantillons. On peut observer le résultat en figure 7.

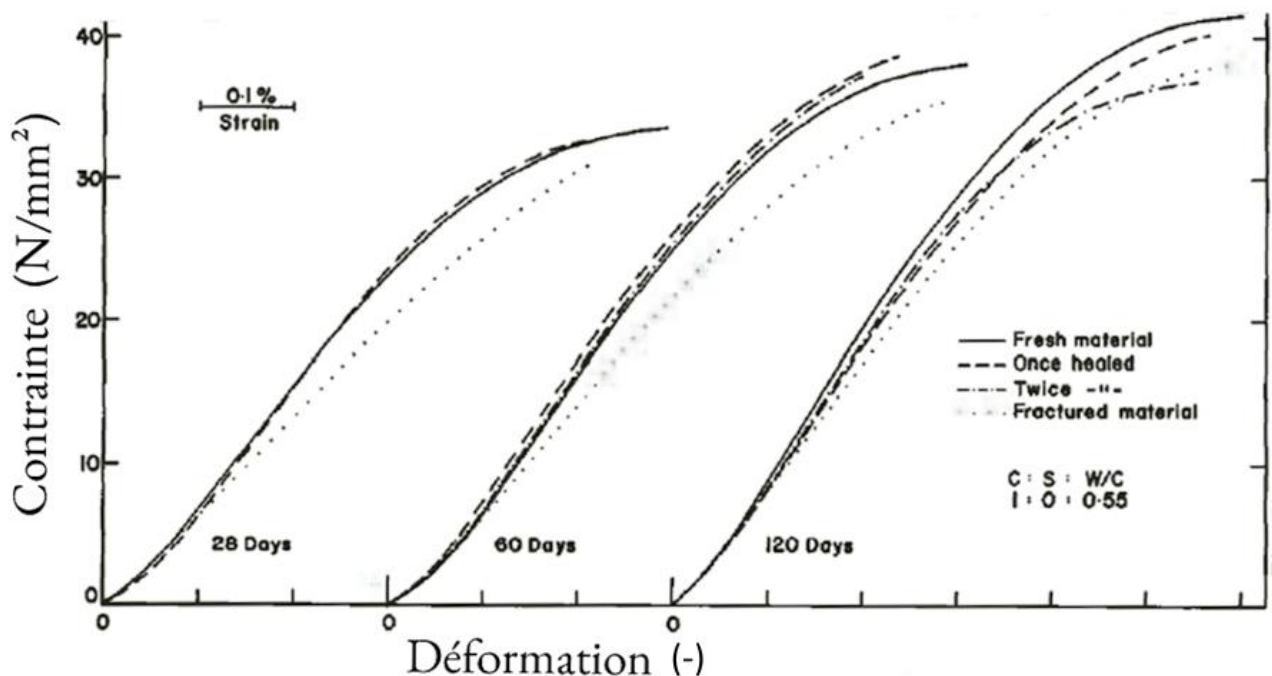


Figure 7 : Relation contrainte-déformation pour les éprouvettes saines, cicatrisées, fissurées et recicatrisées [9]

On observe que les courbes en pointillés (pour le béton cicatrisé et recicatrisé) sont presque superposées à la courbe du matériau initial (sans fissure). Pour un béton de 60 jours, le béton cicatrisé semble même plus rigide à terme. Enfin, on remarque que le béton cicatrisé plus ancien a une rigidité plus faible. L'auto-cicatrisation du béton contenant du laitier est donc plus intéressante au jeune âge (environ 60 jours). Ceci peut être intéressant pour lutter contre la fissuration qui intervient pendant la phase de mise en œuvre.

Pour la résistance en compression des essais ont également été réalisés. On obtient la Figure 8.

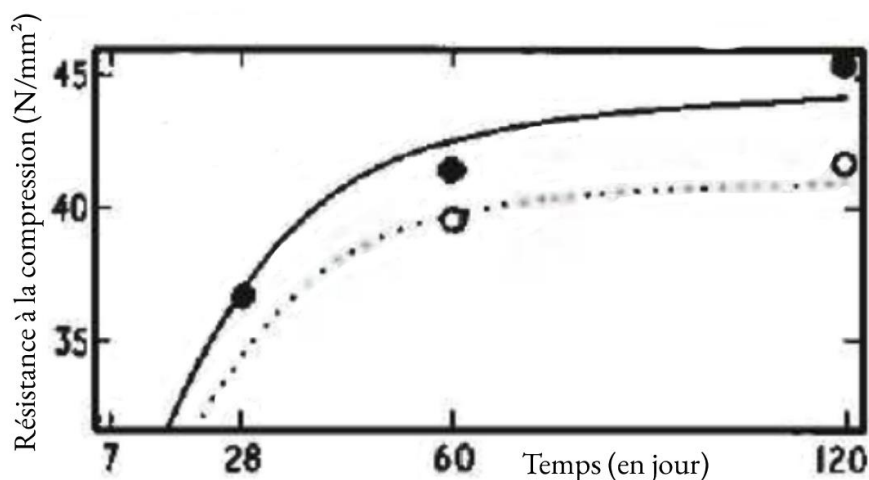


Figure 8 : Résistance à la compression (N/mm²) en fonction du temps (en jour) (trait noir continu : matériau sain ; trait pointillé : matériau fissuré ; point noir rempli : matériau fissuré-cicatrisé ; point non rempli : matériau refissuré-recicatrisé) [9]

Après cicatrisation, le béton a donc regagné son ancienne résistance en compression (elle semble même encore meilleure au bout de 120 jours). Seulement le béton re-cicatrisé ne semble pas regagner toute sa résistance.

Le laitier de haut fourneau favorise la fissuration au jeune âge du béton. Toutefois sa présence permet au béton de se cicatriser plus rapidement et de regagner ses caractéristiques mécaniques surtout au jeune âge. Ainsi le remplacement partiel de ciment par du laitier de haut fourneau permet de conserver le comportement mécanique du béton grâce à l'auto-cicatrisation tout en diminuant l'impact environnemental.

3 - Procédés pour favoriser l'auto-cicatrisation

Le phénomène naturel d'auto-cicatrisation du béton permet d'augmenter sa durabilité. Il est donc intéressant d'essayer de favoriser cette auto-cicatrisation. Pour cela on peut soit essayer d'apporter plus d'eau au niveau de la fissure (utilisation de polymères) soit par l'apport direct de carbonate de calcium dans la fissure (ajout de bactéries et de champignons).

3.1 - Utilisation de polymères

Les polymères super absorbants absorbent et retiennent des quantités d'eau importantes sans se dissoudre. On peut voir sur la figure 9 que ces polymères sont capables de stocker des quantités très importantes d'eau [10].



Figure 9 : Polymère super absorbant sec et humide [11]

C'est cette caractéristique qui est utilisée pour favoriser l'auto-cicatrisation. Les polymères sont capables de libérer progressivement l'eau, ce qui permet au ciment et ou au laitier anhydre de s'hydrater progressivement. Ainsi les apports d'eau sont plus réguliers et progressifs. Cette méthode d'auto-cicatrisation est très efficace pour des fissures allant jusqu'à 0,15 mm d'épaisseur. Différentes expérimentations ont été menées sur des bétons contenant ces polymères. La première concerne le comportement mécanique après cicatrisation de la fissure [10].



Figure 10 : Cicatrization de fissures de différents types et tailles pour du béton contenant des polymères super absorbants [11]

Lors de cette expérience on peut observer sur la figure 10 que, effectivement, les fissures ont été scellées. Par la suite, les chercheurs ont testé le comportement mécanique de la fissure après cicatrization. Ils ont observé des caractéristiques mécaniques similaires en raideur, par exemple, aux caractéristiques de béton cicatrized dans l'eau sans polymère. Néanmoins, le béton avec polymères n'a besoin que d'une seule hydratation, ce qui pourrait correspondre à une pluie importante, alors que le béton sans polymère a besoin d'être constamment immergé dans l'eau au cours de sa cicatrization.

Les supers absorbants ont tout particulièrement été étudiés pour l'auto-cicatrization des ouvrages en béton armé. Lors de la fissuration des ouvrages en béton armé, il est important de veiller à ce que les armatures ne corrodent pas. Or, les polymères super absorbants permettent d'absorber l'eau et donc de protéger les armatures de la corrosion. Ainsi, des expériences ont été réalisées pour évaluer le comportement de ce béton nouvellement cicatrized vis-à-vis des armatures en acier. L'une des expériences porte sur l'adhérence entre la barre d'armature et le béton cicatrized. Cette étude a été réalisée par des essais d'arrachements [12]. La cicatrization avec les polymères super absorbants semble pour l'instant favoriser l'adhérence entre les aciers et le béton, l'expérience n'étant pas encore arrivée à son terme les résultats exacts ne sont pas encore publiés.

L'utilisation de polymères super absorbants permet de favoriser l'auto-cicatrization dans des conditions réalistes et exploitables, car l'hydratation est continue dans la fissure. De plus, ce type de polymères semble particulièrement adapté pour l'auto-cicatrization dans le cadre d'ouvrages en béton armé, en permettant d'éviter la corrosion des aciers et en favorisant l'adhérence du béton avec les armatures d'aciers.

3.2 - Ajout de bactéries

L'ajout de bactéries est une autre solution innovante pour favoriser l'auto-cicatrisation du béton. Le microbiologiste Hendrik Marius Jonkers [13] a trouvé un moyen d'utiliser des bactéries disponibles dans de la roche volcanique pour permettre l'auto-cicatrisation du béton [9]. Son idée est d'incorporer des billes d'argile contenant les bactéries dans le béton comme schématisé sur la figure 11.

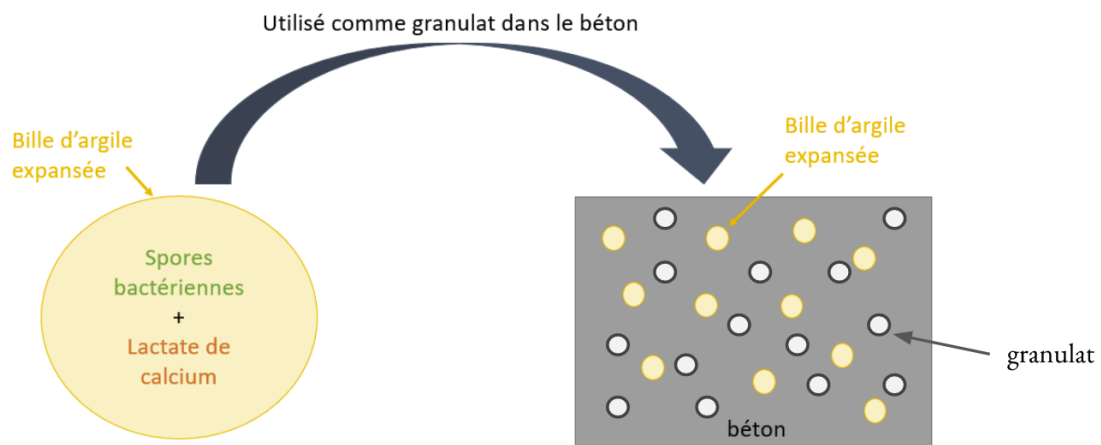


Figure 11 : Schéma de la conception du béton avec des bactéries auto-cicatrisantes

Lors de la fissuration les bactéries en présence d'eau et de nutriments produisent du carbonate de calcium. Le schéma figure 12 explique ce phénomène d'auto-cicatrisation plus en détail.

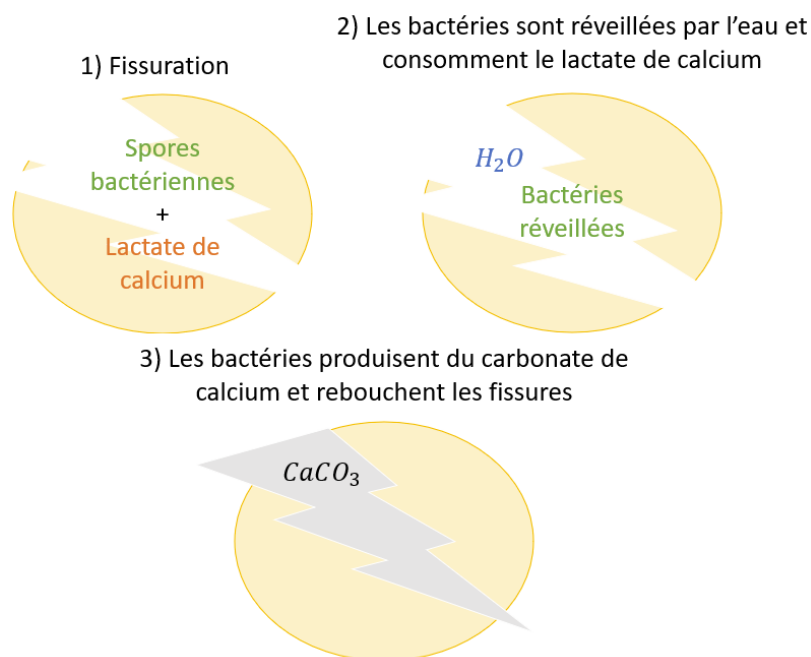


Figure 12 : Schéma montrant les étapes de l'auto-cicatrisation

Cette auto-cicatrisation présente toutefois l'inconvénient de ne pas être renouvelable [14]. En effet, après leur 'réveil' (suite à l'arrivée d'eau) les bactéries ne survivent que quelques mois. De plus, un autre problème de cette méthode est qu'elle est complexe à mettre en place. En effet, la production industrielle de bactéries n'existe pas encore et la mise en place de ce béton est donc très coûteuse. Ainsi cette méthode a été utilisée seulement pour quelques ouvrages au Pays-Bas tel que le bassin de rétention du port de Rotterdam, réalisé par la startup Basilisk [14].

Suite à l'hydratation les bactéries produisent du carbonate de calcium. Celui-ci permet l'auto-cicatrisation. Cette méthode n'est pas encore très répandue car trop coûteuse.

3.3 - Utilisation de champignons

Des chercheurs de l'Université de Binghamton [15] ont développé en 2011 un béton auto-cicatrisant par l'ajout du champignon *Trichoderma reesei*. Ce champignon sous forme de spores fongiques est incorporé à la matrice de béton avec des nutriments. Lors de la fissuration, de l'eau et de l'oxygène arrivent jusqu'aux spores fongiques. Ils commencent alors à germer et à se développer en consommant les nutriments. En se développant, les champignons précipitent du carbonate de calcium. Les fissures se remplissent de carbonate de calcium, le béton devient alors imperméable à l'eau et à l'oxygène. Les champignons se reconstituent ensuite en spore. Ces spores peuvent alors être réactivées.

L'utilisation de champignons a l'avantage d'être renouvelable par rapport aux bactéries. Pour l'instant ce procédé est seulement au stade de recherche. Il n'y pas encore de mise en place d'expérimentation à grande échelle car les scientifiques n'ont pas encore trouvé de moyens pour protéger les spores dans l'environnement sévère qu'est le béton [15].

Le mode d'utilisation des champignons est identique à celui des bactéries. Les champignons présentent l'avantage d'être réutilisables à l'inverse des bactéries. Cette méthode est encore en cours d'expérimentation.

4 - Conclusion :

La fissuration est un phénomène qui peut intervenir à toutes les étapes de la vie d'un ouvrage et peut avoir des conséquences mécaniques, structurelles, économiques et esthétiques et nuire à la sécurité des occupants. Il est donc nécessaire de surveiller les fissures et d'intervenir si besoin. L'auto-cicatrisation du béton apparaît donc comme un moyen d'augmenter la durabilité du béton sans maintenance particulière. L'auto-cicatrisation est un phénomène ancien, le béton romain s'auto-cicatrisait déjà. Le béton classique, produit à partir de ciment, est lui aussi capable de s'auto-cicatriser. De plus, des bétons faits à base de recyclage de laitier et de ciment présentent une aptitude encore plus importante à l'auto-cicatrisation. D'autres méthodes ont également été mises au point pour améliorer la cicatrisation autogène. Des bétons contenant des polymères super absorbants, des bactéries ou des champignons sont en cours d'élaboration et présentent des propriétés intéressantes.

Références :

[1]: C. Y. Namnoum (2021). *Etude de l'influence des additions minérales sur l'auto-cicatrisation des matériaux cimentaires : caractérisation expérimentale et modélisation des propriétés visco-élastiques*. Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Nantes.

[2]: P.-C. Aïtcin, A. Neville & P. Acker (1998). *Les différents types de retrait du béton*. BULLETIN DES LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSEES, 215, mai-juin 1998, réf.4184, pp.41-51.

[3]: Tout sur le béton. *Qu'est-ce que le retrait du béton ?* <https://www.toutsurlebeton.fr/le-ba-ba-du-beton/le-retrait-du-beton/>

[4]: P. Ropert (2023). *Le béton romain, secret de la longévité des structures antiques*. France Culture Vulgarisation. <https://www.radiofrance.fr/franceculture/le-beton-romain-secret-de-la-longevite-des-structures-antiques-8261913>

[5]: N. Hearn (1996). *Comparison of water and propan-2-ol permeability in mortar specimens*. Advances in Cement Research. 8, 81-86.

[6]: S. Granger (2005). *Caractérisation expérimentale du phénomène d'auto-cicatrisation des fissures dans les bétons*. XXIII^{èmes} Rencontres Universitaires de Génie Civil 2005 - RISQUE & ENVIRONNEMENT.

[7]: K. Olivier (2015). *Étude expérimentale de l'auto-cicatrisation des matériaux cimentaires avec laitier de haut-fourneau*. Prix Jeunes Chercheurs « René Houpert ». ISABTP/UPPA, Anglet, 27 au 29 mai 2015.

[8]: K. Olivier (2016). *Étude expérimentale et modélisation de l'auto-cicatrisation des matériaux cimentaires avec additions minérales*. Thèse de doctorat. Ecole Normale Supérieure de Cachan.

[9]: R. K. Dhir, C. M. Sangha, J. G. L. Munday (1973). *Strength and deformation properties of autogenously healed mortars*. ACI Journal, Proceedings, Vol.70, pp. 231-236.

[10]: MaisonResponsable (2021). *Qu'est-ce que le bio-béton, le béton de champignon autoréparant*. https://www.maison-responsable.fr/construire-renover/materiaux-durables/biobeton_autocicatrisant/

[11]: S. S. Mousavi, L. Guizani & C. Ouellet-Plamondon (2020). *Béton autocicatrisant à polymère super absorbant*. <https://www.etsmtl.ca/actualites/beton-autocicatrisant-polymere-super-absorbant>

[12]: AC Presse (2020). *Béton auto-cicatrisant : Le réveil des bactéries*. <https://www.acpresse.fr/beton-auto-cicatrisant-reveil-bacteries/>

[13]: H.M. Jonkers, A. Thijssen, G. Muyzer, O. Copuroglu & E. Schlangen. *Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete*. Journal of Ecological Engineering. 230-235.

[14]: V. Wiktor & H. M. Jonkers (2011). *Un nouveau béton auto-cicatrisant grâce à l'incorporation de bactéries*. Matériaux & Techniques. Vol. 99, n° 5, p.565-571.

[15]: Euronews - Futuris (2015). *Un béton intelligent capable de s'auto-régénérer*. https://www.youtube.com/watch?v=WeX_CJLB-c