

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

Polytechnique Montréal, Montréal, Canada
5 et 6 juillet 2023

DIFFUSION DES CHLORURES DANS UN TIRANT EN BÉTON ARMÉ MAINTENU SOUS CHARGEMENT DE TRACTION : APPROCHE EXPÉRIMENTALE

A. Asselin^{A,B}, J.-P. Charron^B, C. Desmettre^B, F. Benboudjema^A, C. Oliver-Leblond^A

A Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS, LMPS - Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay, Gif-sur-Yvette, France.

B Centre de recherche sur les infrastructures en béton (CRIB), Groupe de recherche en génie des structures, Département de génie civil, géologique et des mines, Polytechnique Montréal, Québec, Canada

RÉSUMÉ : Des essais de migration accélérée ont été menés sur un tirant en béton armé maintenu sous chargement de traction. Différentes conditions de fissuration ont pu être testées : non fissuré, micro-fissuré et macro-fissuré. L'impact des phénomènes de tortuosité, constrictivité et décohésion du béton autour des armatures a été mis en évidence dans le cas de l'étude de la macro-fissuration. Les essais ont également révélé l'effet de maturité des bétons avec une diminution du coefficient de diffusion de façon exponentielle en fonction du temps pour les conditions non fissuré et micro-fissuré. En revanche, l'effet de la micro-fissuration sur la diffusion n'a pas pu être mis en évidence à cause d'une trop grande variabilité des résultats.

1. INTRODUCTION

En conditions de service, les structures en béton armé sont fissurées du fait des chargements mécaniques, thermiques, chimiques et/ou hydriques qu'elles subissent. Ces fissures sont alors le chemin privilégié par les agents agressifs, tels que les chlorures présents dans les sels de déverglaçage ou dans l'environnement marin pour pénétrer l'enrobage. Une fois qu'ils ont atteint les armatures en quantité suffisante, ils initient le phénomène de corrosion qui entraîne la dégradation des structures.

La mesure du coefficient de diffusion des chlorures dans le béton permet de quantifier la durabilité des structures par rapport à ce phénomène. Cette mesure est généralement réalisée sur un béton sain, c'est-à-dire sans fissuration, comme dans les travaux de (Andrade *et al.*, 2000). Néanmoins, puisque la fissuration est présente en conditions de service et qu'elle est le chemin privilégié par les chlorures pour pénétrer le béton, il semble par conséquent approprié de mesurer le coefficient de diffusion en condition fissurée.

Certaines études ont cherché à évaluer le coefficient de diffusion en condition fissurée, mais leur nombre reste limité. Par ailleurs, il existe une grande variété de montages permettant de réaliser cette mesure en condition fissurée. Il est ainsi possible de distinguer trois grandes familles :

- Les méthodes de mesures sur fissures artificielles sont assez simples à mettre en œuvre et permettent de contrôler l'ouverture de fissure obtenue (Ismail *et al.*, 2004). Néanmoins, de telles fissures ne sont pas présentes dans les structures réelles.
- Les spécimens peuvent être fissurés par l'intermédiaire d'un essai classique – mécanique (Djerbi *et al.*, 2008), gel-dégel (Jacobsen *et al.*, 1996), *etc* – avant d'être déchargés pour effectuer la mesure du coefficient de diffusion. Néanmoins, le déchargement des spécimens testés implique une refermeture partielle ou totale des fissures obtenues, ce qui ne correspond pas exactement aux conditions retrouvées en réalité dans les structures.
- Les mesures du coefficient de diffusion obtenues pendant le maintien d'une charge mécanique (Turgeon-Mallette, 2019) sont celles qui s'approchent le plus d'un contexte de structure réelle. Ce type d'essai permet de s'approcher du faciès de fissuration trouvée dans les structures.

Les essais permettant la mesure du coefficient de diffusion pendant le maintien d'un chargement mécanique sont par conséquent les plus pertinents pour s'approcher du coefficient de diffusion effectivement trouvé dans les structures. Néanmoins, ces dernières sont généralement en béton armé, ce qui modifie la distribution des fissures. Actuellement, il n'existe pas à notre connaissance d'essais permettant la mesure du coefficient de diffusion en présence d'une armature, sous maintien d'un chargement mécanique et en présence d'une fissuration, comme le sont les structures en conditions de service.

Afin de pallier ce manque, l'objectif de ce projet de recherche a été de développer une mesure du coefficient de diffusion dans un tirant en béton armé, maintenu sous chargement, micro- et macro-fissuré. Pour se rapprocher au plus près d'une structure réelle, il a été choisi de mener les essais dans un spécimen représentatif d'une armature et son enrobage situé en fibre inférieure d'un pont, comme décrit dans le travail de (Desmettre et Charron, 2012). Le pont subissant un chargement de flexion sous son poids propre et les charges d'exploitation, le spécimen testé est donc maintenu sous chargement de traction. Cet article présente la méthodologie et les résultats obtenus dans le cadre de ces essais.

2. MÉTHODOLOGIE

2.1 Programme expérimental

Ce programme expérimental a pour objectif d'effectuer des mesures du coefficient de diffusion sur un tirant en béton armé, fissuré et maintenu sous chargement de traction directe. Pour cela, 6 tirants en béton armé, issus d'un même lot de fabrication, ont été testés à différentes échéances. Sur chacun des spécimens, trois zones ont été testées selon un essai de migration. En parallèle, des spécimens de référence, c'est-à-dire fabriqués dans le même lot et ayant subi exactement les mêmes conditions excepté le chargement mécanique, ont également été testés. L'objectif du chargement mécanique des spécimens était d'obtenir la localisation de la première macro-fissure dans la zone centrale du tirant chargé. Les deux autres zones se trouvent alors micro-fissurées du fait du champ de déformation non homogène dans le tirant en béton armé (Figure 1). Ainsi, pour chaque échéance testée, une condition macro-fissurée, deux conditions micro-fissurées et un spécimen de référence étaient prévus. Néanmoins, pour deux échéances, la mesure sur la macro-fissure n'a pas été possible en raison de la non-étanchéité du silicone autour de la zone à tester

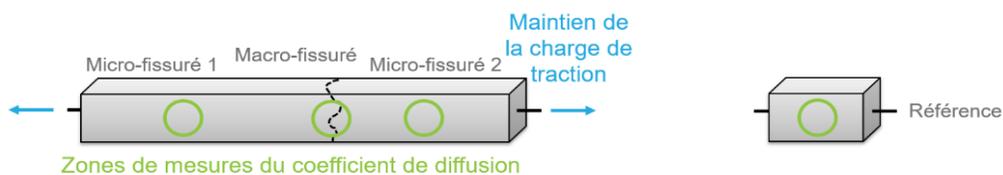


Figure 1 - Schématisation des zones testées à chaque échéance.

2.2 Matériaux, géométrie et pré-conditionnement des spécimens

Le béton utilisé pour ce projet est un béton ordinaire de rapport eau/liant égal à 0,6. Le ciment utilisé est un ciment Portland à usage général canadien (type GU), équivalent à un ciment CEM I. La composition du béton est donnée dans le Tableau 1. À 28 jours, ce béton a une résistance à la compression égale à 37,6 MPa, une résistance à la traction de 2,3 MPa et un module d'Young égal à 28,7 GPa (essais réalisés sur cylindres).

Tableau 1 - Composition du béton testé.

Composants	Quantité unitaire (kg/m ³)
Ciment	375
Eau	225
Sable	851,5
Pierre	774
Superplastifiant	0,43

La barre d'armature utilisée est une barre en acier de nuance canadienne 400W et de diamètre 11,3 mm. Elle est recouverte d'une résine époxy pour éviter la corrosion. Une retouche du recouvrement est effectuée avant son utilisation afin d'assurer une couverture parfaite. Pour les spécimens testés en maintien de la charge, les armatures sont dotées d'un filetage conique à chaque extrémité.

Les spécimens testés pour les essais de migration en maintien de la charge sont des tirants en béton armé de section 11x10 cm² et de longueur 100 cm. Des spécimens de référence, en béton armé, de section 11x10 cm² et de longueur 25 cm sont également testés. Dans les deux cas, l'armature est placée au centre de la section.

Après décoffrage, 24h après la fabrication, les spécimens sont stockés en chambre humide à humidité relative supérieure à 95% afin de saturer au maximum la porosité du béton jusqu'à 3 jours avant le début de l'essai de migration. Pendant les 3 jours restants, les spécimens sont immergés dans une solution à 0,3N de NaOH.

10 jours avant le début des essais de migration, les spécimens sont scellés avec un silicone en dehors des zones de mesure du coefficient de diffusion. Pour les tirants qui seront maintenus sous chargement, le spécimen n'est pas du tout scellé sur la zone centrale pour ne pas gêner la fissuration.

2.3 Procédure pour les spécimens maintenus sous chargement

Une presse hydraulique universelle de capacité 2,5 MN permet de réaliser le chargement de traction des tirants en béton armé. Le chargement est contrôlé par le déplacement moyen de capteurs LVDT placés sur deux faces opposées du spécimen, à une vitesse de 0,1 mm/min. L'arrêt du chargement se fait lors de la localisation de la première macro-fissure sur le spécimen.

Une fois que le niveau de chargement souhaité est atteint, le déplacement du vérin est maintenu constant afin de mettre en tension le dispositif de maintien de la charge. En effet, en raison de la durée longue des essais de migration et du risque de corrosion liée à la présence de chlorures, il n'était pas possible de laisser le spécimen maintenu sous chargement dans la presse de traction.

Le dispositif de maintien de la charge est composé de plaques, tiges filetées et écrous en acier, comme montré sur la Figure 2a). Le transfert d'effort entre la tige placée dans les mâchoires de la presse de chargement et l'armature du tirant testé s'effectue par l'intermédiaire d'un manchon conique permettant de solliciter toute la section de l'armature. Le principe de fonctionnement est le donné sur la Figure 2b).

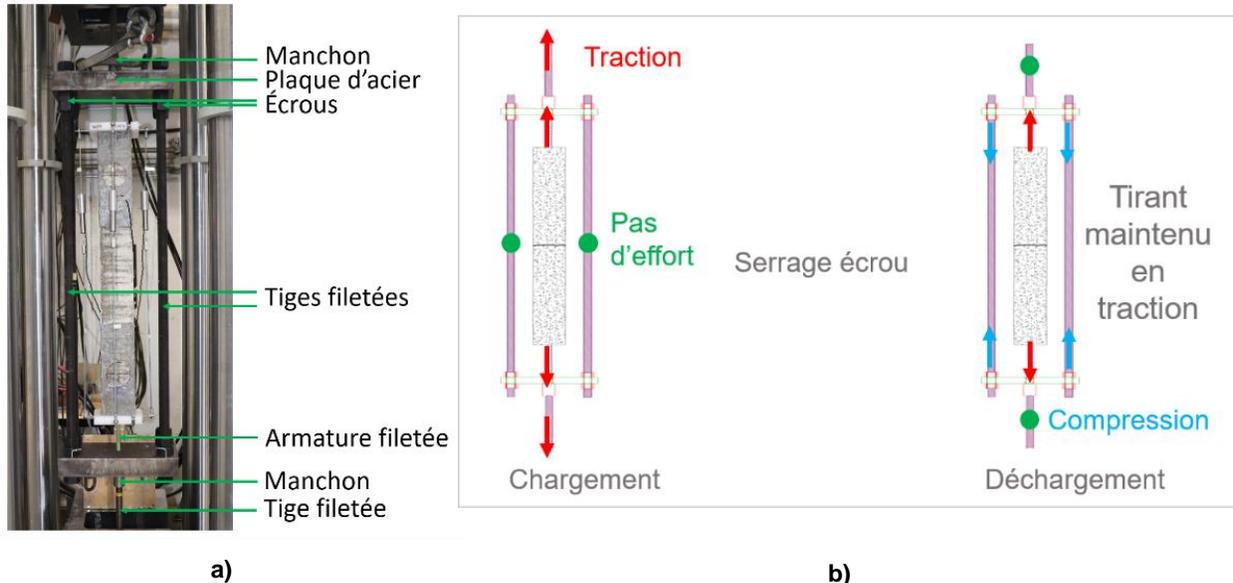


Figure 2 - Dispositif de maintien de la charge : a) composition, b) protocole de mise en place.

Dans un premier temps, pendant le chargement mécanique avec la presse hydraulique, les écrous sont laissés libres, ce qui permet la transmission de l'effort entre la presse et le tirant en béton armé. Lorsque le déplacement du vérin est maintenu constant, les écrous sont serrés. Puis, la presse hydraulique est déchargée avec une vitesse égale à 0,1 mm/min jusqu'à atteindre un effort nul. Cette étape permet de mettre les tiges filetées en compression et de maintenir la traction à travers le tirant en béton armé. Il est alors possible de sortir le tirant en béton armé, maintenu en traction par le dispositif, de la presse hydraulique.

Lorsque le spécimen est sorti de la presse hydraulique, une mesure de l'ouverture de la macro-fissure est réalisée avec un microscope optique. Pour chaque face, une photographie est prise tous les 5 mm avec le microscope optique avec l'aide d'un repère tracé au feutre sur le béton. La mesure est alors prise au milieu du repère en reliant les deux lèvres de la fissure. Une moyenne de toutes les ouvertures de fissure mesurées est alors réalisée pour chaque spécimen.

Enfin, la zone centrale du tirant maintenu sous chargement est scellée en dehors des zones de mesure du coefficient de diffusion. Les essais de migration sont alors démarrés sur les zones micro-fissurées, tandis que l'essai sur la zone centrale est démarré le lendemain pour permettre au silicone de durcir.

2.4 Procédure des essais de migration en régime permanent

Les essais de migration sont réalisés selon la norme (NT Build 355,1997) modifiée pour le projet. Pour cela, une cellule contenant une solution avec 0,3N de NaOH et 0,5M de NaCl (amont) est placée d'un côté du spécimen à tester. En vis-à-vis est placée une cellule contenant 0,3N de NaOH (aval). Entre ces deux cellules, un potentiel électrique constant est imposé afin d'accélérer la diffusion des chlorures de la cellule amont vers la cellule aval. Le dispositif d'essai est donné sur la Figure 3a).

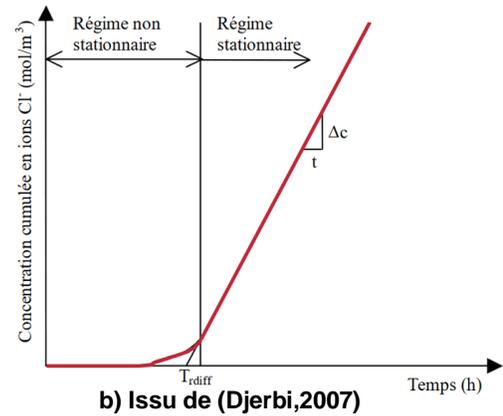
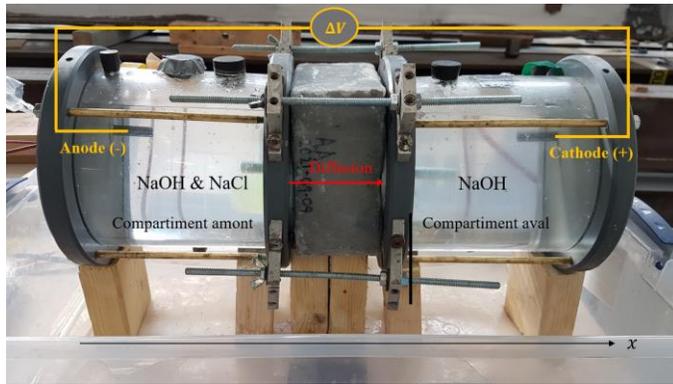


Figure 3 - Essai de migration accélérée : a) montage, b) évolution de la concentration aval

L'évolution de la concentration dans le compartiment amont s'effectue en deux temps, comme le montre la Figure 3b):

- Tout d'abord, pendant le régime transitoire, les chlorures n'ont pas encore traversé l'échantillon de béton et la concentration en aval reste nulle puis la concentration augmente progressivement et de façon non linéaire ;
- Enfin, la concentration en chlorures dans le compartiment aval augmente linéairement avec le temps pendant le régime permanent ou stationnaire. La pente de l'évolution de concentration est alors proportionnelle au coefficient de diffusion effectif.

Le suivi de la concentration dans le compartiment aval se fait par conséquent en régime permanent. Pour cela, des prélèvements réguliers de la solution aval sont effectués et la concentration en chlorures est alors déterminée par titration potentiométrique au nitrate d'argent en concentration 0,1 mol/L.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats obtenus sur le tirant maintenu sous chargement de traction sont étudiés selon la fissuration obtenue et comparés aux valeurs de référence.

3.1 Effets de la macro-fissuration

D'après (Tognazzi *et al.*, 1998), le béton fissuré (de coefficient de diffusion D et d'aire $A_{sain} + A_f$) est supposé être la mise en parallèle d'un béton sain (de coefficient de diffusion D_{sain} et d'aire A_{sain}) et d'une fissure (de coefficient de diffusion D_f et d'aire A_f). Ainsi, le coefficient de diffusion dans le béton fissuré s'écrit selon l'équation (1).

$$D = \frac{D_{sain} A_{sain} + D_f A_f}{A_{sain} + A_f} \quad (1)$$

Le modèle de (Djerbi *et al.*, 2008) permet de calculer le coefficient de diffusion dans la fissure en fonction de l'ouverture de fissure w (équation (2)). Il est alors possible de calculer théoriquement le coefficient de diffusion dans le béton macro-fissuré en fonction de l'ouverture de fissure.

$$D_f = \begin{cases} D_{sain} & \text{si } w < 30\mu\text{m} \\ 2 \times 10^{-11}w - 4 \times 10^{-10} & \text{si } 30\mu\text{m} \leq w < 80\mu\text{m} \\ 1,4 \times 10^{-9} & \text{si } 80\mu\text{m} \leq w \end{cases} \quad (2)$$

Les coefficients de diffusion mesurés expérimentalement sur la zone macro-fissurée sont présentés sur la Figure 4 en fonction de l'ouverture de fissure. Les coefficients de diffusion mesurés sur le spécimen de référence sont associés à l'ouverture de fissure de la zone macro-fissurée mesurée à la même échéance. Enfin, les valeurs théoriques déduites avec les modèles de Tognazzi et Djerbi sont calculées à partir du coefficient de diffusion mesuré sur le spécimen de référence.

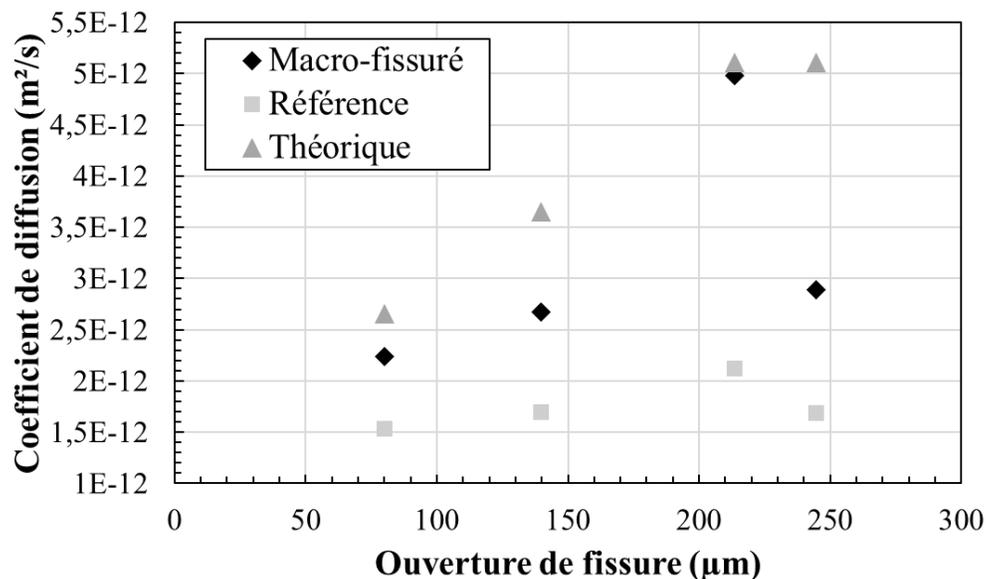


Figure 4 - Coefficients de diffusion dans le béton fissuré : valeurs expérimentales, de référence et théoriques.

Sur toute la gamme d'ouvertures de fissure étudiées, les valeurs mesurées sur la zone macro-fissurée se distinguent fortement des valeurs de référence, ce qui montre bien l'impact de la macro-fissuration sur la diffusion.

En revanche, il était attendu que les valeurs mesurées expérimentalement soient proches des valeurs théoriques, ce qui n'est pas le cas. Cette différence peut s'expliquer globalement par les hypothèses prises en compte dans le modèle. En effet, la partition des flux de Tognazzi considère des fissures droites avec des bords parallèles, comme montré sur la Figure 5a). En réalité, dans le cas du tirant testé expérimentalement, plusieurs phénomènes supplémentaires, non pris en compte dans le modèle, peuvent intervenir, comme montré sur la Figure 5b) :

- La fissure est pincée du fait de la présence de l'armature (constrictivité). Ainsi l'ouverture de fissure est plus large sur la face extérieure, là où elle est mesurée qu'à l'intérieur du spécimen. Ce phénomène diminue la valeur du coefficient de diffusion.
- La fissure comporte une tortuosité, c'est-à-dire que la distance réellement parcourue par les chlorures est plus grande que la longueur considérée dans le modèle théorique. De même, la prise en compte de ce phénomène dans les modèles devrait diminuer le coefficient de diffusion.
- Le spécimen peut également comporter une décohésion le long de l'armature, créée par le chargement de traction. Cette décohésion augmente le flux transverse de chlorures et par conséquent, les chlorures sont ralentis dans l'axe testé. Ce phénomène diminue également le coefficient de diffusion.

La différence entre les valeurs théoriques du modèle et les valeurs expérimentales mesurées mettent en évidence la présence des phénomènes de pincement, de tortuosité et de décohésion. Ces trois phénomènes pourraient être intégrés au modèle, ce qui permettrait de diminuer le coefficient de diffusion théorique calculé et de réduire les écarts entre les valeurs théoriques et les valeurs mesurées expérimentalement.

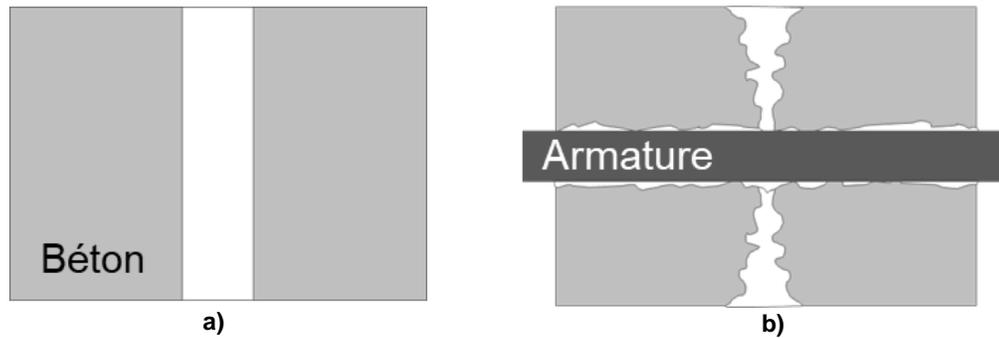


Figure 5 - Schématisation de la fissure a) telle que prise en compte dans le modèle, b) présente expérimentalement

Enfin, le troisième point des valeurs expérimentales se distingue des autres points par sa proximité avec les valeurs théoriques. Cette différence pourrait s'expliquer par la présence d'une multi-fissuration non détectée lors des mesures d'ouverture de fissure au microscope : l'ouverture de fissure aurait été sous-estimée et la valeur théorique associée à ce point serait donc plus élevée.

3.2 Effet de la micro-fissuration

La Figure 6 présente les coefficients de diffusion mesurés expérimentalement sur la zone micro-fissurée et les valeurs de référence en fonction de l'âge du béton au début de l'essai de migration.

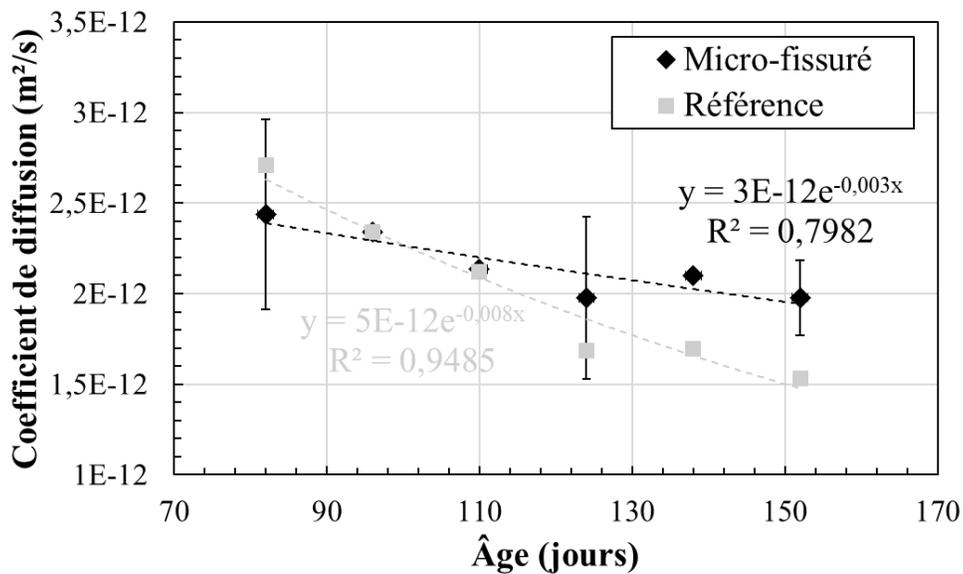


Figure 6 - Coefficient de diffusion dans le béton micro-fissuré et valeur de référence en fonction de l'âge du béton.

Les coefficients de diffusion des spécimens de référence et des zones micro-fissurées semblent diminuer exponentiellement sur la plage de temps étudiée. Néanmoins, la vitesse de décroissance du coefficient de diffusion n'est pas la même suivant si le spécimen est micro-fissuré ou non.

Par ailleurs, la variabilité des résultats sur la micro-fissuration est assez grande : il n'est pas possible de contrôler l'apparition de la micro-fissure, ni même de la caractériser. Il est par conséquent possible d'avoir des micro-fissures très différentes à la même échéance sur les deux zones où l'essai de migration est réalisé. Ceci explique probablement la valeur assez médiocre du coefficient de détermination de la régression exponentielle pour le micro-fissuré (0,80 contre 0,95 pour la référence). Aussi, cette grande variabilité empêche de conclure quant à l'effet de la micro-fissuration sur les coefficients de diffusion par rapport aux valeurs de référence. Des essais supplémentaires sont en cours pour compléter la banque de données déjà acquises.

4. CONCLUSION

Au cours de ce programme expérimental, des essais de migration accélérée ont été menés sur des tirants en béton armé maintenus sous chargement de traction, c'est-à-dire dans des conditions très proches de la réalité des structures. Ces essais ont permis de déterminer le coefficient de diffusion des chlorures dans différentes conditions fissurées (micro- et macro-fissure). Des spécimens de référence, non fissurés, ont également été testés.

Les résultats de macro-fissuration ont été comparés aux valeurs de référence et à des valeurs théoriques calculées avec les modèles de Tognazzi et de Djerbi à partir des ouvertures de fissure mesurées. La macro-fissure se distingue nettement des valeurs de référence. En revanche, au contraire de ce qui est attendu, les valeurs théoriques sont bien plus élevées que celles mesurées. Ceci peut s'expliquer par les phénomènes de tortuosité, constrictivité et décohésion du béton au niveau de l'armature qui ne sont pas pris en compte dans le modèle.

L'effet de maturité sur le coefficient de diffusion a également été mis en évidence sur les spécimens de référence et les zones micro-fissurées, avec une diminution exponentielle du coefficient de diffusion en fonction du temps. Il est à noter que le coefficient de diffusion diminue plus fortement pour les spécimens de référence que pour les zones micro-fissurées.

En revanche, la variabilité très grande des résultats sur les zones micro-fissurées pour une même échéance ne permet pas de tirer de conclusion sur l'effet de la micro-fissuration sur la diffusion par rapport aux spécimens de référence. Des essais supplémentaires sont en cours afin de fournir des données pour conclure sur ce point.

Un modèle numérique de type lattice-particulaire est en cours de développement pour tester différentes configurations de macro-fissure (tortuosité, constrictivité, etc) et comprendre l'impact de chacun des phénomènes sur la diffusion.

5. RÉFÉRENCES

- Andrade, C., Castellote, M., Alonso, C. et González, C. (2000) Non-steady-state chloride diffusion coefficients obtained from migration and natural diffusion tests. Part I : Comparison between several methods of calculation, *Materials and Structures*, 33.1: 21-28.
- Desmettre, C. et Charron, J.-P. (2012) Water permeability of reinforced concrete with and without fiber subjected to static and constant tensile loading, *Cement and Concrete Research*, 42: 945–952.
- Djerbi, A., Bonnet, S., Khelidj, A., Baroghel-Bouny, V. (2008) Influence of traversing crack on chloride diffusion into concrete. *Cement and Concrete Research*, 38: 877–883.
- Ismail, M., Toumi, A., François, R. et Gagné, R. (2004) Effect of crack opening on the local diffusion of chloride in inert materials, *Cement and Concrete Research*, 34.4: 711-716.
- Jacobsen, S., Marchand, J. et Boisvert, L. (1996) Effect of cracking and healing on chloride transport in OPC concrete, *Cement and Concrete Research*, 26.6: 869-881.

NT Build 355 (1997) *Chloride diffusion coefficient from migration cell experiments*, Nordtest Method.

Tognazzi, C., Ollivier, J.-P., Carcasses, M. et Torrenti, J.-M. (1998) Couplage fissuration/dégradation chimique des matériaux cimentaires : Premiers résultats sur les propriétés de transfert, *Ouvrages, Géomatériaux et Interactions*, 69-84.

Turgeon-Malette, V. (2019) *Durabilité du béton fibré à ultra-haute performance Effet de la présence de microfissures sur la migration des ions chlorure*, Université de Laval, Québec, QC, Canada.