

# Méthodologie pour l'évaluation du coefficient de diffusion des chlorures dans le béton armé sous chargement de traction

**Amandine Asselin**

*Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS, LMPS - Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay, 91190, Gif-sur-Yvette, France. 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, Montréal H3C 3A7, Canada.*

**RESUME** L'exposition à un environnement marin ou à des sels de déverglaçage est à l'origine de phénomènes de corrosion des armatures dans les structures en béton armé : les chargements mécanique, thermique et/ou hydrique entraînent effectivement la formation de fissures, lesquelles sont alors un chemin privilégié pour la pénétration des chlorures jusqu'aux armatures. La mesure du coefficient de diffusion des chlorures dans le béton est un bon indice de la résistance du béton à cette pénétration. Il est actuellement souvent mesuré sur des bétons sans armature, sains ou dans une condition fissurée après déchargement. Or, les structures comportent des armatures et sont en réalité soumises à des chargements conduisant à la création de fissures même en conditions de service en règle générale. Afin de rendre compte de l'impact de ces conditions sur la mesure du coefficient de diffusion, un protocole expérimental a été développé : le coefficient de diffusion est mesuré pendant un essai de migration sous champ électrique en régime permanent dans un tirant en béton armé maintenu sous un chargement de traction.

**Mots-clés** diffusion, chlorures, béton armé, fissuration, traction.

## I. INTRODUCTION

Les structures en béton armé présentent souvent des fissurations en conditions de service à cause des chargements (mécaniques, thermiques, etc.) qu'elles subissent. Du fait de l'environnement, elles peuvent également être exposées à des agents agressifs comme les chlorures présents dans les embruns marins ou dans les sels de déverglaçage. Les fissures sont alors les chemins privilégiés par les chlorures, entraînés par l'eau, pour pénétrer le béton d'enrobage, atteindre les barres d'armatures en acier et initier la corrosion de ces dernières, entraînant ainsi la dégradation progressive de la structure.

Le coefficient de diffusion des chlorures dans le béton est un bon indicateur de la capacité de ce dernier à résister à la pénétration des chlorures. Il est généralement mesuré sur un béton sain non fissuré (Sanchez, 2018) ou sur un béton préalablement fissuré par un chargement de traction directe (Fu et al., 2016) ou de traction indirecte (Djerbi et al., 2008 ; Jang et al., 2011), mais jamais en présence d'armatures et uniquement après déchargement. Or, dans les structures, en plus de

présenter des fissures liées au chargement, le béton est généralement renforcé d'armatures en acier et sous chargement.

À partir de ce constat, ce doctorat a eu pour premier objectif de développer un protocole de mesure du coefficient de diffusion des chlorures dans un tirant en béton renforcé d'une armature en acier et représentatif d'une structure pendant un chargement de traction, dans le but de connaître l'impact de la micro- et de la macro-fissuration sur ce phénomène de transport. Un deuxième objectif de ce doctorat était de développer une modélisation des phénomènes de fissuration et de diffusion des chlorures dans le tirant en béton armé à l'aide d'un modèle lattice-particulaire. Seul le premier objectif sera abordé dans cet article.

La mesure du coefficient de diffusion des chlorures a été réalisée sous champ électrique pendant le régime permanent sur la base de la norme NT Build 355 (Nordtest method, 1997). Des ajustements de paramètres ont été effectués en raison de la présence d'armature et de l'épaisseur du tirant, celle-ci étant plus importante que l'épaisseur des spécimens généralement utilisés pour de tels essais afin de représenter une épaisseur d'enrobage de l'armature représentative de la réalité des structures (FIGURE 1a). Les paramètres d'essais ont été ajustés à la fois pour obtenir une fissuration uniquement transversale, similaire à des fissures de flexion et pour réaliser des essais de migration accélérée dans un temps raisonnable. Par ailleurs, un système de maintien de la charge de traction a été développé afin d'effectuer l'essai de migration en dehors de la presse, tout en maintenant le chargement (FIGURE 1b). L'optimisation du dispositif a été réalisée par un modèle aux éléments finis, tandis que la vérification du maintien de la charge s'est faite par l'intermédiaire de corrélation d'images et de capteurs de déplacement. Enfin, la combinaison des deux parties précédentes a rendu possible la réalisation d'un essai de migration accélérée sur un tirant maintenu sous charge de traction (FIGURE 1c), ce qui a permis d'obtenir des coefficients de diffusion dans différents états du béton : sain (sur une référence non-chargée), micro-fissuré et macro-fissuré (sur les tirants chargés).

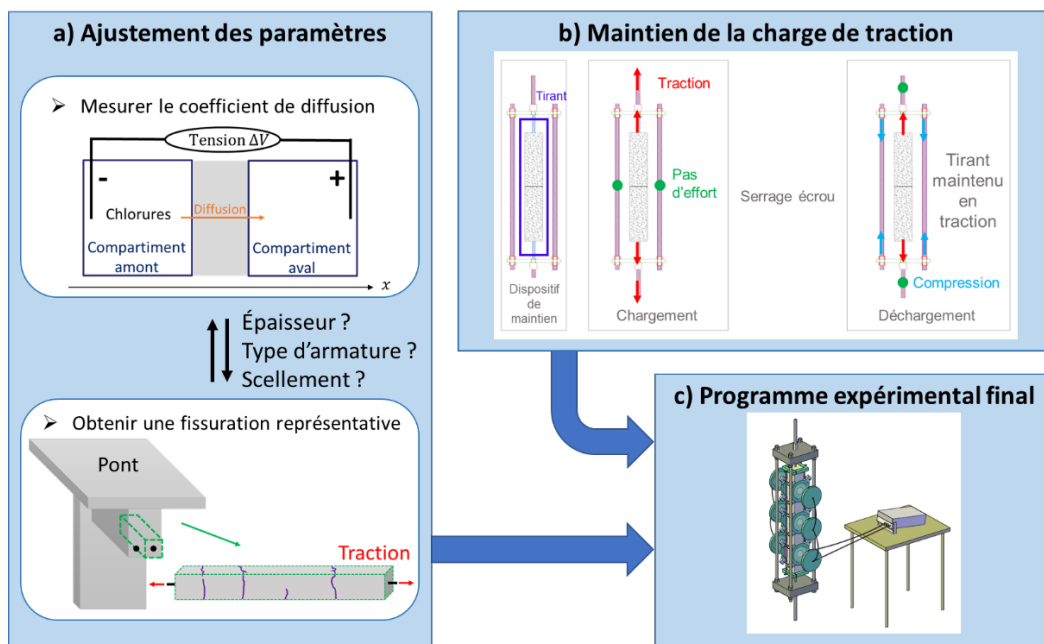


FIGURE 1. Phases du projet.

## II. AJUSTEMENT DES PARAMÈTRES D'ESSAI

### A. Méthodologie d'un essai de migration accélérée

Les essais de migration accélérée sont réalisés sur la base de la norme NT Build 355 (Nordtest method, 1997). Un échantillon de béton est placé entre deux compartiments contenant des solutions de soude caustique (0,3 mol/L). La solution en amont contient également des chlorures à une concentration connue (0,5 mol/L), tandis que la solution en aval n'en contient pas initialement (FIGURE 2). Un potentiel électrique constant est imposé entre les deux compartiments par l'intermédiaire d'électrodes et permet d'accélérer la traversée des chlorures du compartiment amont vers le compartiment aval. Le suivi de la concentration en chlorures dans le compartiment aval est effectué grâce à des prélèvements réguliers de solution qui sont ensuite analysés par titration potentiométrique au nitrate d'argent. L'évolution de la concentration dans le compartiment aval s'effectue en trois temps :

- Tout d'abord, 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 pendant le régime transitoire ;
- Enfin, la concentration en chlorures dans le compartiment aval augmente linéairement avec le temps pendant le régime permanent. La pente de l'évolution est alors proportionnelle au coefficient de diffusion, ce qui permet de le déterminer.

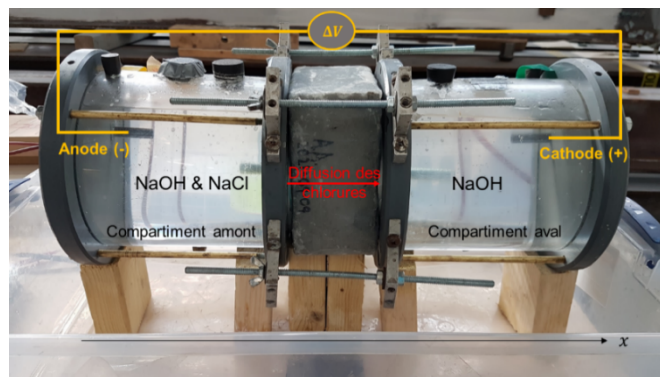


FIGURE 2. Dispositif d'essai de migration accélérée.

Dans ce projet, les essais de migration accélérée sont non conventionnels parce qu'ils sont réalisés sur des tirants en béton armé représentatifs d'une structure et maintenus en chargement, ce qui a nécessité des adaptations qui seront détaillées dans la suite de l'article.

### B. Paramètres généraux

Afin de représenter les structures existantes et leur chargement, le spécimen choisi pour l'étude est un tirant en béton armé maintenu sous une charge de traction représentant une armature entourée de son enrobage de béton et située à la fibre tendue d'une poutre en flexion (par exemple dans un pont). Bien que les structures en béton armé soient généralement composées d'armatures en acier conventionnel, l'utilisation de telles armatures pose problème pour les essais de diffusion. En effet,

la présence de chlorures, associée au champ électrique conduit à une corrosion rapide des armatures, entraînant la fissuration du spécimen étudiée avant la fin de l'essai de migration accélérée (Petre-Lazar, 2001). Il a par conséquent été choisi de travailler avec des armatures en acier recouverte d'époxy (Asselin et al., 2022). Ces dernières n'ont pas montré d'influence notable sur la mesure du coefficient de diffusion et ont permis de reproduire des patrons de fissuration similaires à ceux obtenus avec une armature conventionnelle, contrairement à des armatures composites en fibre de verre et résine époxy également étudiées en début de projet. Bien que la résine époxy modifie l'adhérence entre l'armature et le béton, la présence de l'armature a permis de retrouver le pincement de la fissure comme dans une structure réelle. De plus, l'épaisseur du tirant a également été choisie pour représenter un enrobage classique dans les structures et pour limiter les impacts sur le déroulement de l'essai de migration accélérée.

Les paramètres de l'essai de migration ont également été adaptés par rapport à la norme NT Build 355 (Nordtest method, 1997) pour pouvoir réaliser les essais de migration accélérée dans les meilleures conditions (Asselin et al., 2022). Ainsi, le potentiel imposé aux bornes du béton a été diminué pour éviter la formation de composés chlorés empêchant la détermination du coefficient de diffusion. Un changement de solution aval pendant l'essai a également permis de réduire ces risques.

### *C. Dispositif de maintien de la charge*

Étant donné la durée de l'essai de migration accélérée sur plusieurs jours, il était impossible de laisser le tirant maintenu sous charge de traction dans la presse pour des raisons de sécurité. Une fois que le chargement appliqué par la presse atteint le niveau souhaité dans le tirant, un dispositif développé à partir du dispositif de maintien de la charge de (Desmettre, 2011) maintient la charge dans le tirant et permet le déchargement de la presse (FIGURE 3). L'armature utilisée dans le tirant en béton armé est filetée à ses extrémités avec un filet conique afin de pouvoir y visser un manchon permettant la transmission de l'effort de la presse à l'armature. Avant le chargement, le tirant en béton armé est placé dans le dispositif de maintien de charge, il y est maintenu par l'intermédiaire des deux manchons placés à l'extérieur de chacune des plaques d'acier. Des tiges filetées en acier sont vissées de l'autre côté des manchons et permettent de transmettre l'effort entre la presse de traction et le tirant : ce sont elles qui se trouvent par la suite dans les mors de serrage de la presse de traction. Pendant le chargement, les écrous situés dans la partie haute du dispositif ne sont pas serrés et la plaque d'acier est laissée libre, tandis que la plaque du bas est bloquée à l'aide des écrous, ce qui permet de ne transmettre l'effort de traction que dans le tirant en béton armé. À la fin du chargement, tous les écrous du dispositif de maintien de la charge sont serrés, puis le déplacement de la presse est ramené à zéro. Ainsi, l'effort de traction dans le tirant est maintenu constant par l'intermédiaire des quatre tiges filetées du dispositif, lesquelles se trouvent comprimés. À l'inverse, les tiges filetées vissées sur le manchon et reliées à la presse sont déchargées et peuvent ainsi être retirées pour faciliter la sortie du spécimen de la presse de traction (FIGURE 1).

Le développement du dispositif s'est effectué par l'intermédiaire d'un modèle aux éléments finis pour déterminer les épaisseurs des pièces d'acier nécessaires à la reprise du chargement de traction. Des essais de validation en laboratoire effectués avec des capteurs de déplacement placés entre les plaques d'acier ont permis de valider que la flexion des plaques était faible et que le

déplacement imposé au tirant en béton armé était bien maintenu lors du transfert d'effort entre la presse et le dispositif de maintien de la charge.

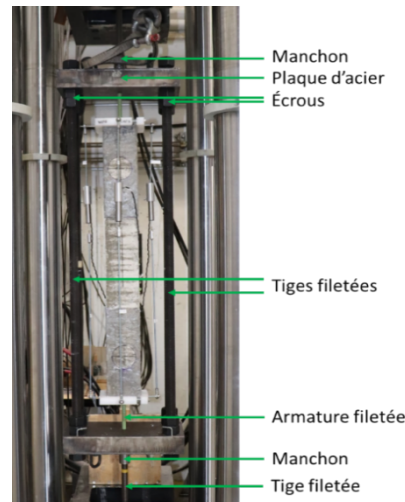


FIGURE 3. Dispositif de maintien de la charge de traction.

### III. METHODOLOGIE D'UN ESSAI SOUS CHARGEMENT MECANIQUE

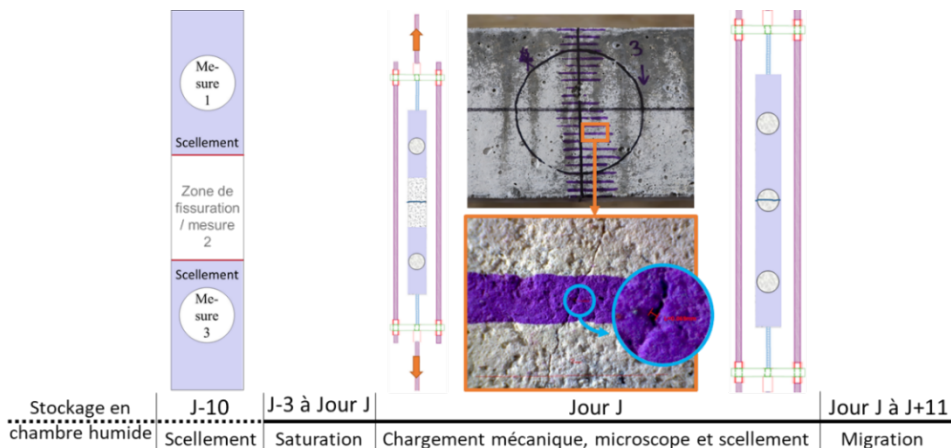
Les essais finaux ont été réalisés sur des tirants en béton armé, de dimensions 100x10x11 cm<sup>3</sup>, composé d'un béton ordinaire, de rapport eau sur ciment (E/C) égal à 0,6, fabriqué à partir de ciment Portland canadien d'usage général (GU). La résistance à la compression du béton est 37,6 MPa, sa résistance en traction est 2,3 MPa et son module d'Young est 28,7 GPa. Pour chaque tirant testé sous chargement, un essai de migration accélérée est réalisé dans les mêmes conditions sur un spécimen de béton sain, non chargé, de dimensions 25x10x11 cm<sup>3</sup> et contenant également une armature (référence). Les spécimens ont été placés en chambre humide (HR>95%) dès le décoffrage à 24h et jusqu'à 3j avant le début de l'essai. Le scellement des surfaces des tirants a été réalisé 10 jours avant le début de l'essai autour des zones pour lesquelles la micro-fissuration sera étudiée, tandis que celui autour de la macro-fissuration a été réalisé après le chargement mécanique pour cibler précisément l'endroit où la fissure s'est développée. Enfin, 3 jours avant le début de l'essai, le spécimen a été placé en saturation dans une solution de soude caustique (0,3 mol/L) similaire à la solution du compartiment aval.

L'essai mécanique débute par la mise en place du tirant en béton armé dans le dispositif de maintien de la charge présenté précédemment. Des capteurs LVDT de la longueur du spécimen sont également installés sur les 4 faces. Le dispositif de maintien de la charge ainsi que le tirant sont alors chargés en traction à une vitesse de 0,1 mm/min. L'arrêt du chargement de traction s'effectue lorsque la valeur moyenne de deux capteurs LVDT placés sur des faces parallèles atteint 0,2 mm. Une fois le chargement arrêté, le déplacement est alors maintenu dans le tirant et le dispositif, le tout pouvant être éventuellement un peu déchargé pour obtenir une ouverture de fissure plus faible. Les écrous du dispositif de maintien de la charge sont ensuite serrés avant le déchargement complet de tout le dispositif. À la fin du déchargement, le tirant est maintenu en traction par le dispositif et il est possible de sortir tout le dispositif de la presse de chargement pour la suite des manipulations. Le spécimen

alors obtenu est macro-fissuré sur la zone centrale et micro-fissuré sur les extrémités en raison du champ de déformation non homogène dans le spécimen.

Par la suite, la fissure obtenue dans le spécimen est observée à l'aide d'un microscope optique afin de déterminer son ouverture. Pour cela, les mesures sont faites tous les 5 mm sur chacune des faces. Le scellement est ensuite appliqué autour de la zone de mesure fissurée pour maintenir la saturation du spécimen pendant l'essai. Une seconde mesure de l'ouverture de fissure est effectuée après l'essai de migration afin de vérifier que l'éventuelle relaxation des armatures n'a pas eu d'effet sur la fissuration. Cette mesure permet aussi de contrôler qu'il n'y a pas eu de variation de longueurs des tiges filetées pendant l'essai.

Enfin, les essais de migration sont lancés de façon parallèle sur le spécimen de référence, et sur les zones micro-fissurées du tirant maintenu sous charge. L'essai sur zone fissurée est démarré un jour plus tard pour permettre au scellement de sécher. Les essais de migration accélérée durent alors 11 jours pendant lesquels un changement de solution dans les compartiments en aval est réalisé et 6 prélèvements de solution aval pour analyse de la concentration sont effectués. La FIGURE 4 récapitule le déroulement complet d'un essai de migration accélérée sous chargement de traction.



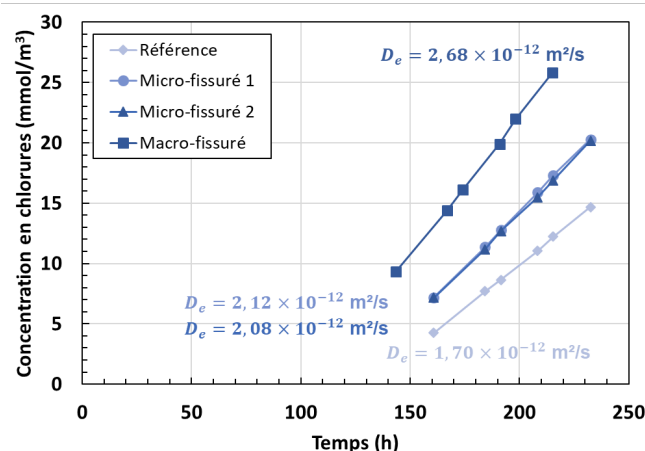
**FIGURE 4.** Chronologie d'un essai de migration accélérée sous chargement de traction.

#### IV. RESULTATS ET DISCUSSION

Dans cette partie, les résultats présentés sont issus d'un tirant et d'un spécimen de référence âgés de 138 jours le jour du chargement mécanique et du début de l'essai de migration accélérée. Le chargement mécanique a entraîné l'ouverture d'une seule macro-fissure au milieu du spécimen, qui a été en partie déchargé avant de maintenir le chargement via le dispositif expérimental. L'ouverture de fissure moyenne mesurée sur les 4 faces est de 140 µm. La FIGURE 5 donne l'évolution temporelle de la concentration avale en chlorures dans les compartiments aval pendant l'essai de migration ainsi les coefficients de diffusion effectifs ( $D_e$ ) calculés pour le spécimen de référence en béton sain, les zones micro-fissurées 1 et 2, et la zone macro-fissurée du tirant maintenu sous chargement de traction.



Le spécimen de référence non chargé présente un coefficient de diffusion de  $1,7 \times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s. Les zones micro-fissurées du tirant chargé se distinguent du spécimen de référence par un coefficient de diffusion des chlorures supérieurs de 24% à celle de la référence. Cet écart est suffisamment grand pour être considéré en dehors de la variabilité intrinsèque du béton et s'explique par le fait que le chargement mécanique a entraîné une ouverture de la porosité invisible à l'œil nu, mais permettant une diffusion plus facile des chlorures.



**FIGURE 5.** Évolution de la concentration aval en chlorures en fonction du temps et coefficient de diffusion effectif pour le spécimen de référence et les 3 zones de mesure du tirant en béton armé maintenu sous chargement de traction.

Concernant la zone macro-fissurée du tirant chargé, le coefficient de diffusion des chlorures mesuré est supérieur de 58% au coefficient de diffusion de la référence et de 28% des zones micro-fissurée. La macro-fissure a donc un impact très significatif sur la diffusion des ions chlorures. Il est possible de comparer ce résultat avec un modèle parallèle de fissure droite introduit par (Djerbi et al., 2008) donnant le coefficient de diffusion dans le béton fissuré sans armature à partir de celui dans le béton sain, de celui dans la fissure et de l'ouverture de cette dernière. Le coefficient de diffusion dans la fissure est pris égal au coefficient de diffusion dans l'eau ( $1,4 \times 10^{-9}$  m<sup>2</sup>/s). Avec les données de l'essai, ce modèle permet de trouver la valeur théorique de  $3,6 \times 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s, soit une différence de 36,6% avec la mesure expérimentale. Cette différence peut s'expliquer par la géométrie de la fissure. En effet, en présence d'une armature, la fissure se trouve pincée et plus fine localement. La diminution de son ouverture et par conséquent la réduction de la diffusion dans cette zone, explique probablement en partie le coefficient de diffusion expérimental réduit par rapport à celui du modèle théorique à fissure droite. Une seconde explication est liée à la tortuosité de la fissure. La fissure dans le tirant n'est pas symétrique comme dans le modèle théorique, la tortuosité conduit également une diminution globale de la valeur du coefficient de diffusion.

## V. CONCLUSION

Ce projet de recherche avait pour objectif de comprendre l'influence de la micro- et de la macro-fissuration sur la diffusion des chlorures dans le béton armé maintenu dans des conditions représentatives d'une structure en conditions de service, c'est-à-dire à l'état fissuré et sous

chargement. Pour cela, un protocole de mesure du coefficient de diffusion dans un tirant en béton armé maintenu sous chargement de traction a été développé.

La méthode choisie pour la mesure du coefficient de diffusion a été l'essai de migration accélérée sous champ électrique pendant le régime permanent. Le développement du protocole expérimental a nécessité des ajustements sur certains paramètres puisque, par exemple, la norme NT Build 355 (Nordtest method, 1997) ne prévoit pas la présence d'une armature. La nécessité d'obtenir une fissure uniquement transversale a orienté le choix de l'armature en acier recouverte d'époxy ainsi que le choix de l'épaisseur du tirant. La tension imposée pendant l'essai de migration a été adaptée à l'épaisseur de tirant et un changement de solution aval a aussi été ajouté. Enfin, un système de maintien de la charge a également été développé afin de sortir le tirant en béton armé de la presse pour effectuer l'essai de migration accélérée tout en maintenant le chargement de traction.

Pendant la réalisation d'un essai de migration accélérée sur un tirant en béton armé, il a été montré que la micro-fissuration entraînait une augmentation de 24% du coefficient de diffusion par rapport à un béton armé sain. La macro-fissuration entraîne une augmentation de 150% du coefficient de diffusion par rapport à celui de la référence. L'effet mesuré expérimentalement est inférieur à celui calculé avec un modèle théorique de fissure droite pour la même ouverture de fissure. Cette différence pourrait s'expliquer par le pincement de la fissure au niveau de l'armature et la tortuosité de la fissure, qui réduirait par conséquent l'ouverture moyenne de la fissure sur le volume du spécimen. Dans une autre partie de la thèse, l'utilisation d'un modèle lattice-particulaire pour la fissuration et la diffusion pourrait permettre de confirmer cette hypothèse. Enfin, l'obtention et l'analyse des résultats expérimentaux est encore en cours et permettra d'affiner les résultats présentés.

## REFERENCES

Asselin, A., Charron, J.-P., Desmettre, C., Simon-Boursier, O., Benboudjema, F., Oliver-Leblond, C., 2022. Évaluation du coefficient de diffusion des chlorures dans le béton armé sous chargement mécanique. Présenté au Congrès Français de la Mécanique, Nantes.

Desmettre, C., 2011. Contribution à l'étude de la perméabilité du béton armé sous sollicitations statiques et cycliques (Mémoire). École Polytechnique de Montréal.

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.

Fu, C., Ye, H., Jin, X., Yan, D., Jin, N., Peng, Z., 2016. Chloride penetration into concrete damaged by uniaxial tensile fatigue loading. *Construction and Building Materials* 125, 714–723.

Jang, S.Y., Kim, B.S., Oh, B.H., 2011. Effect of crack width on chloride diffusion coefficients of concrete by steady-state migration tests. *Cement and Concrete Research* 41, 9–19.

Nordtest method, NT Build No. 355, Chloride diffusion coefficient from migration cell experiments, 1997.

Petre-Lazar, I., 2001. Évaluation du comportement en service des ouvrages en béton armé soumis à la corrosion des aciers, outil d'aide à la décision (Mémoire). Université Laval, Québec.

Sanchez, T., 2018. Étude comparative de la diffusion d'espèces anioniques et cationiques dans les matériaux cimentaires : étude expérimentale et numérique (Mémoire). Université de La Rochelle.