



**HAL**  
open science

## Évaluation du coefficient de diffusion des chlorures dans le béton armé sous chargement mécanique

Amandine Asselin, Jean-Philippe Charron, Clélia Desmettre, Olivier Simon-Boursier, Farid Benboudjema, Cécile Oliver-Leblond

► **To cite this version:**

Amandine Asselin, Jean-Philippe Charron, Clélia Desmettre, Olivier Simon-Boursier, Farid Benboudjema, et al.. Évaluation du coefficient de diffusion des chlorures dans le béton armé sous chargement mécanique. 25ème Congrès Français de la Mécanique 2022, Aug 2022, Nantes, France. hal-03946608

**HAL Id: hal-03946608**

**<https://hal.science/hal-03946608>**

Submitted on 19 Jan 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Évaluation du coefficient de diffusion des chlorures dans le béton armé sous chargement mécanique

A. ASSELIN<sup>1,2,a</sup>, J.-P. CHARRON<sup>1,b</sup>, C. DESMETTRE<sup>1,c</sup>, O. SIMON-BOURSIER<sup>1,d</sup>, F. BENBOUDJEMA<sup>2,e</sup>, C. OLIVER-LEBLOND<sup>2,f</sup>

<sup>1</sup> 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.

<sup>2</sup> Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, ENS Paris-Saclay, CNRS, LMPS - Laboratoire de Mécanique Paris-Saclay, 91190, Gif-sur-Yvette, France.

- a. [amandine.asselin@ens-paris-saclay.fr](mailto:amandine.asselin@ens-paris-saclay.fr)
- b. [jean-philippe.charron@polymtl.ca](mailto:jean-philippe.charron@polymtl.ca)
- c. [clelia.desmettre@polymtl.ca](mailto:clelia.desmettre@polymtl.ca)
- d. [olivier.simon-boursier@polymtl.ca](mailto:olivier.simon-boursier@polymtl.ca)
- e. [farid.benboudjema@ens-paris-saclay.fr](mailto:farid.benboudjema@ens-paris-saclay.fr)
- f. [cecile.oliver@ens-paris-saclay.fr](mailto:cecile.oliver@ens-paris-saclay.fr)

## Résumé :

*En conditions de service, les structures en béton armé sont fissurées, ceci favorise la pénétration et la diffusion des ions chlorures pouvant initier la corrosion des armatures en acier. L'objectif de ce projet est de mesurer l'influence des deux types de fissuration (micro- et macro- fissures), obtenue sous chargement de traction, sur la mesure du coefficient de diffusion des chlorures sous champ électrique en régime permanent. Les essais de migration étant réalisés sur un tirant en béton armé dont l'épaisseur est représentative de l'enrobage dans une structure, le programme expérimental préliminaire, dont les résultats sont présentés dans cet article, consiste à vérifier l'impact des modifications apportées au montage d'essai normalisé. Ainsi, l'influence de la barre d'armature ainsi que de l'épaisseur du spécimen sont étudiées.*

## Abstract:

*In service conditions, reinforced concrete structures are cracked, which enable the chloride ingress and diffusion and could initiate steel reinforcement corrosion. This project aims to measure the impact of both micro- and macro- cracks, obtained under tensile load, on chloride diffusion coefficient. Steady-state migration tests carried out under electrical field are conducted on a reinforced concrete tie specimen, whose thickness is representative of reinforcement cover in structures. Results given in this paper come from the preliminary experimental program, consisting in the verification of changes in the procedure regarding to the current norm. The impact of the reinforcing bar and the specimen thickness are studied.*

**Mots clés : migration des ions chlorures, béton armé, traction, fissuration.**

## 1 Introduction

Les structures en béton armé sont souvent fissurées du fait des différentes sollicitations mécaniques et environnementales qu'elles subissent pendant leur durée de vie. Ces fissures représentent un chemin privilégié pour la pénétration des agents agressifs, notamment pour les ions chlorures entraînés par l'eau à travers le béton. Lorsque les chlorures atteignent les barres d'armature en acier en quantité suffisante, ils initient la corrosion des barres qui, en se propageant, dégrade progressivement la structure. La mesure du coefficient de diffusion des ions chlorures dans le béton permet de quantifier la capacité de pénétration de ces agents agressifs et donne ainsi un indicateur de la durabilité du béton.

Les mesures du coefficient de diffusion des chlorures sont le plus souvent effectuées sur du béton non armé sain [1] et, dans certaines études, sur du béton non armé fissuré, généralement endommagé à l'aide d'un essai de fendage puis déchargé avant la mesure de diffusion [2,3,4]. Ces études de diffusion sur du béton fissuré ont démontré une augmentation linéaire du coefficient de diffusion en fonction de l'ouverture de fissure jusqu'à atteindre le coefficient de diffusion dans l'eau libre pour des ouvertures de fissures supérieures à 80  $\mu\text{m}$  [5]. Néanmoins, les spécimens généralement utilisés dans ces études ne permettent pas de rendre parfaitement compte de la réalité des structures en béton en conditions de service, ces dernières étant armées, sous chargement (macrofissures non refermées et possible présence de microfissuration entre les macrofissures) et multi-fissurées.

L'objectif de ce projet de recherche est de comprendre l'impact des différents types de fissuration rencontrés en service dans les structures en béton armé (micro- et macro- fissurations) sur le coefficient de diffusion des chlorures. Pour ce faire, des mesures de diffusion seront effectuées sur différentes zones d'un tirant en béton armé sollicité en traction à un niveau représentatif des conditions de service. La mesure du coefficient de diffusion des chlorures sera, quant à elle, effectuée sous champ électrique en régime permanent, suivant la norme NT Build 335 [6]. Étant donné que les essais de diffusion seront effectués dans des conditions hors-normes (présence d'une barre d'armature, épaisseur de spécimen plus importante), un premier volet du projet consistait à évaluer l'impact de ces paramètres sur les mesures du coefficient de diffusion. Après une description plus détaillée de la méthodologie expérimentale du projet global, cet article discutera de l'impact de ces paramètres sur le coefficient de diffusion du béton sain.

## 2 Méthodologie expérimentale

L'objectif général de ce projet de recherche est de mesurer le coefficient de migration des chlorures dans un tirant en béton armé, sous un chargement représentatif des conditions de service. Afin d'atteindre cet objectif lors d'une phase expérimentale finale, trois phases expérimentales préliminaires, décrites ci-dessous et illustrées à la **Figure 1** ont été planifiées.

### **1<sup>ère</sup> phase expérimentale préliminaire (partie CHIMIE, Figure 1a) :**

Étant donné que les essais de migration seront effectués dans des conditions hors-normes, cette 1<sup>ère</sup> phase expérimentale préliminaire consiste à évaluer l'impact de la barre d'armature et du type de barre (acier conventionnel, barre recouverte d'époxy ou barre composite), ainsi que l'impact de l'épaisseur du spécimen, sur les mesures de diffusion des ions chlorures. Les résultats obtenus sur du béton sain serviront à déterminer les modifications à effectuer sur les paramètres d'essai (dimensions du spécimen, voltage, concentration des solutions, etc.) par rapport à la norme NT Build 335 [6]. Des essais sur béton

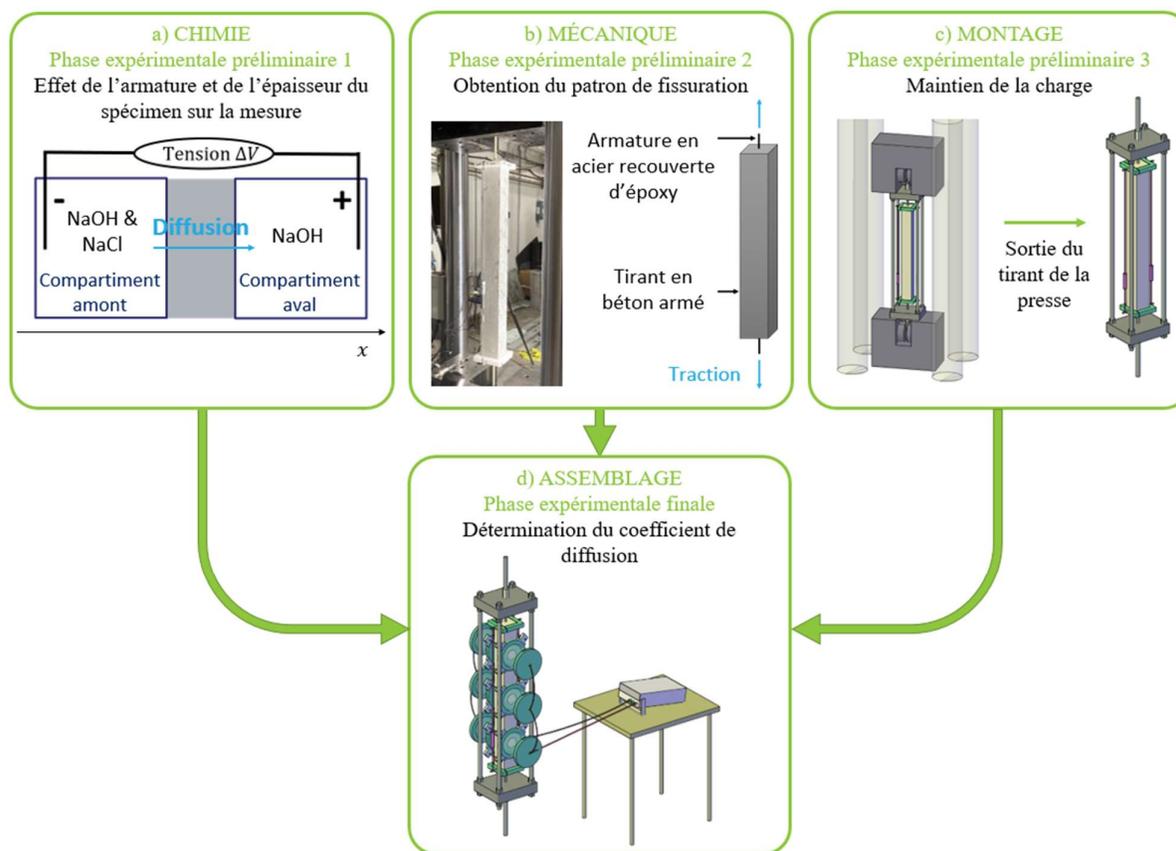
fissuré seront ensuite effectués avec les paramètres sélectionnés. Parallèlement aux essais expérimentaux, des simulations sont réalisées avec les modules ‘transport des espèces ioniques en milieu poreux’ et ‘électrostatique’ du logiciel Comsol Multiphysics®. Elles sont calibrées avec les résultats expérimentaux et utilisées ensuite pour évaluer différentes conditions d’essais à étudier.

### **2<sup>ème</sup> phase expérimentale préliminaire (partie MÉCANIQUE, Figure 1b) :**

Cette phase consiste à évaluer l’impact du type de barre et de la géométrie des tirants, en particulier leur section, sur le mode de fissuration. L’objectif est de déterminer la configuration d’essai optimale pour les essais finaux, en lien également avec les résultats obtenus lors de la première phase expérimentale préliminaire. Lors de ces essais mécaniques, les tirants sont sollicités en traction sous chargement quasi-statique et la fissuration est caractérisée en détail à l’aide d’un système de mesure par corrélation d’images.

### **3<sup>ème</sup> phase expérimentale préliminaire (partie MONTAGE, Figure 1c) :**

Cette phase consiste à concevoir un système de maintien du chargement pour la réalisation des essais de migration sur le tirant fissuré. Le système doit permettre de solliciter le tirant en traction dans une presse hydraulique, puis ensuite de maintenir ce même chargement en dehors de la presse pour l’introduction des cellules de diffusion.



**Figure 1 :** Phases d’optimisation du montage expérimental

Les résultats obtenus lors des phases expérimentales préliminaires permettront de fixer la procédure d’essai de la phase expérimentale principale (ASSEMBLAGE, **Figure 1d**) qui répondra à l’objectif général du projet.

Cet article présente les premiers résultats de la 1<sup>ère</sup> phase expérimentale préliminaire. Il décrit la procédure d'essai de migration utilisée (section 3) et présente l'influence de la barre d'armature (section 4), du voltage et de l'épaisseur du spécimen (section 5) sur la diffusion des chlorures au travers du béton sain.

### 3 Procédure d'essai de migration en régime permanent

Le béton utilisé lors des essais de migration de la 1<sup>ère</sup> phase expérimentale préliminaire est un béton ordinaire de rapport eau sur ciment (E/C) de 0,6 fabriqué à partir de ciment Portland canadien d'usage général (GU). Sa résistance à la compression est de 35 MPa à 28 jours. Suite à leur fabrication, les spécimens cylindriques de béton sont directement couverts d'un film de polythène puis sont ensuite décoffrés à 24h. Une fois décoffrés, ils sont placés en cure dans une chambre humide jusqu'à 7 jours. Suite à cette cure, les spécimens sont sortis de la chambre humide le temps de sceller, à l'aide de silicone, les surfaces qui ne seront pas en contact avec les solutions lors de l'essai de migration. Une fois le scellement mis en place, les spécimens sont replacés dans la chambre humide. Trois jours avant le début de l'essai, qui a lieu à 14 jours, les spécimens sont saturés dans une solution à 0,3 mol/L de NaOH.

Lors des essais de migration, des cellules de 2,85 L de capacité sont positionnées sur les deux faces opposées du spécimen cylindrique de béton (**Figure 1a**). La cellule en amont contient une solution de 0,3 mol/L de NaOH et 0,5 mol/L de NaCl, tandis que la cellule en aval contient une solution de 0,3 mol/L de NaOH. La surface de contact des solutions avec le béton est de 64 cm<sup>2</sup>. Une fois les cellules en place et remplies avec les solutions, une différence de potentiel est imposée entre les deux cellules, ce qui permet d'accélérer la traversée des ions chlorures de la cellule en amont vers la cellule en aval. L'analyse de la quantité de chlorures ayant traversé le spécimen se fait en prélevant régulièrement des échantillons de la solution en aval pour en déterminer la concentration en ions chlorures par titration potentiométrique. Cette titration se fait en ajoutant du nitrate d'argent en concentration 0,1 mol/L dans l'échantillon de solution prélevée. La fréquence et le volume des prélèvements varient en fonction de l'avancement de l'essai et donc de la concentration en ions chlorures dans la cellule aval.

Le coefficient de diffusion effectif des ions chlorures est déterminé à partir de la pente de l'évolution temporelle de la concentration dans le compartiment aval lorsque cette évolution devient linéaire, signe que le régime permanent est atteint. De par l'application du champ électrique, le phénomène de migration est supposé unidirectionnel et la diffusion naturelle des ions chlorures est supposée négligeable. De plus, le coefficient de diffusion effectif considère juste les ions libres et non les ions qui se lient à la matrice cimentaire durant le processus. Finalement, le béton étant initialement saturé, le phénomène de convection est considéré négligeable devant la migration des ions chlorures. À partir de ces hypothèses, il est possible de déterminer le flux de chlorures traversant le spécimen avec la relation de Nernst-Planck. En effectuant un bilan de quantité d'ions chlorures ayant traversé le spécimen, il est possible de lier la concentration en aval du dispositif et le coefficient de diffusion effectif  $D_e$  en introduisant une grandeur  $\varepsilon$  telle que :

$$\varepsilon = \frac{c_{aval} \times V \times R \times T \times e}{F \times c_{amont} \times \Delta V \times S}$$

Avec :

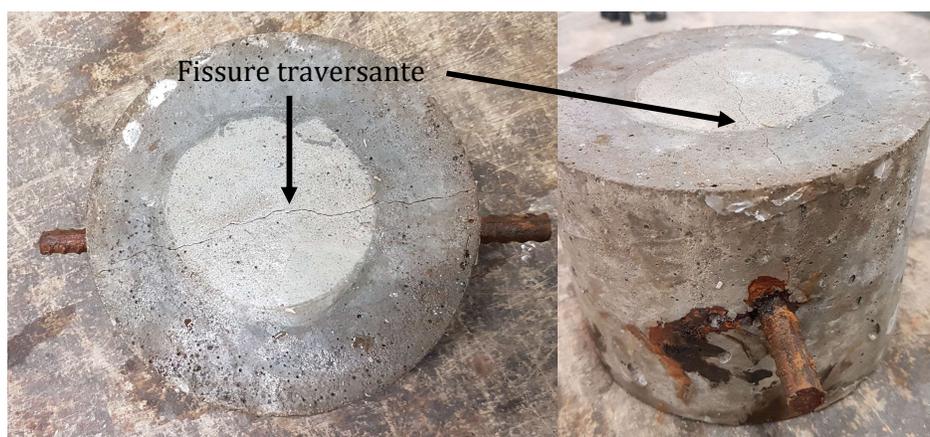
- $c_{aval}(t)$  la concentration dans la solution en aval (mol/L) ;
- $V$  le volume de solution dans la cellule en aval (m<sup>3</sup>) ;

- $R$  la constante universelle des gaz parfaits ( $R = 8,314 \text{ J/mol/K}$ ) ;
- $T$  la température de la solution (K) ;
- $e$  l'épaisseur du spécimen (m) ;
- $F$  la constante de Faraday ( $F = 96\,485 \text{ C/mol}$ ) ;
- $c_{amont}$  la concentration dans la solution en amont (mol/L) ;
- $\Delta V$  la différence de potentiel (V) ;
- $S$  la surface du spécimen soumise à l'essai de diffusion ( $\text{m}^2$ ).

Cette grandeur  $\varepsilon$ , fonction des paramètres de l'essai et de la concentration dans la solution en aval est telle que, pendant le régime permanent,  $\varepsilon = D_e t$  où  $t$  est le temps écoulé depuis le début de l'essai : son évolution linéaire permet la détermination du coefficient de diffusion effectif des chlorures dans le béton au moyen de la pente de la courbe.

## 4 Effet de la présence d'armature sur les résultats des essais de migration

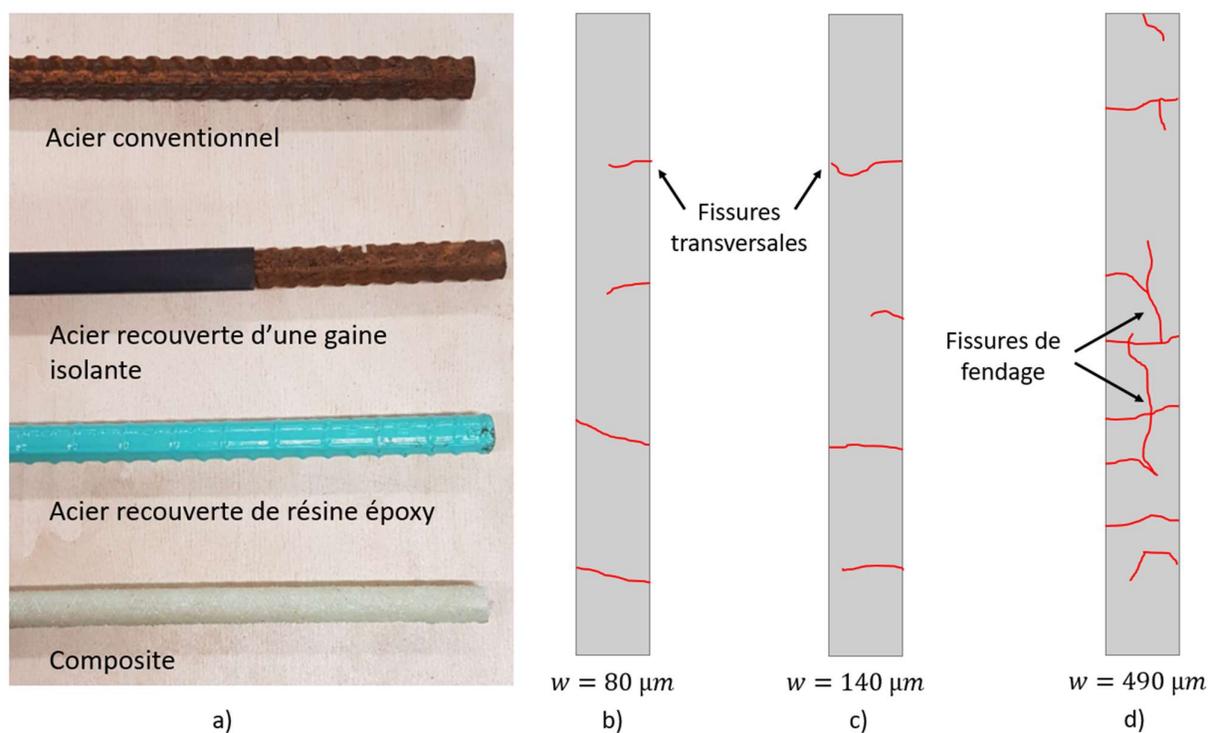
Afin de se rapprocher de la réalité des structures, il a été choisi dans ce projet d'effectuer des mesures de diffusion sur un tirant en béton armé (cf. section 2). La très grande majorité des ouvrages en béton armé utilisent des armatures en acier conventionnel (nuance canadienne 400W). Cependant, l'utilisation d'une telle armature, corrodable, est problématique en présence de chlorures et d'un champ électrique. La configuration de l'essai de migration tel que décrit à la section 3 reviendrait alors à effectuer un essai de corrosion accélérée de l'armature [7] et induirait un endommagement supplémentaire non souhaité dans le tirant. Ceci causerait des enjeux de sécurité en lien avec le maintien du chargement. De plus, la consommation d'ions chlorures par le processus de corrosion induirait des valeurs non représentatives du coefficient de diffusion. Afin de vérifier cette hypothèse, un essai de migration a été mené sur un spécimen de béton de 100 mm d'épaisseur avec une armature d'acier conventionnel (diamètre de 11,3 mm) en son centre (**Figure 2**). Le champ électrique imposé dans le béton était de 8,5 V/cm. Après 7 jours d'essai, tel qu'anticipé, une fissure traversante s'est formée sous l'effet de la corrosion de l'armature (**Figure 2**) et l'essai a été arrêté.



**Figure 2** : Fissuration et produits de rouille liés à la corrosion de l'armature en acier

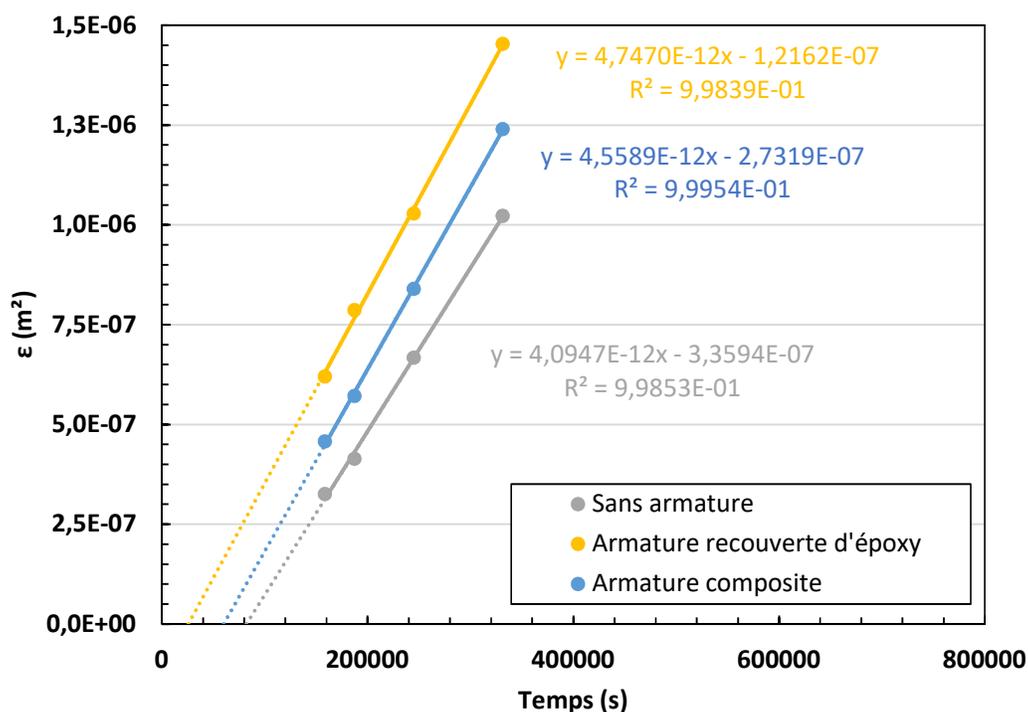
L'utilisation d'une armature conventionnelle n'étant pas envisageable pour les raisons évoquées précédemment, trois solutions de remplacement ont été envisagées : une armature composite en fibres de verre et résine époxy, une armature en acier recouverte d'une gaine isolante, généralement utilisée pour isoler des câbles électriques, et une armature en acier recouverte de résine époxy (**Figure 3**). Ces armatures alternatives ont un diamètre similaire à celle en acier conventionnel, soit un diamètre de 11,3 mm. Des tirants de béton (section 100 x 100 mm) avec les différentes armatures alternatives ont d'abord été soumis à des essais mécaniques pour évaluer la différence de fissuration obtenue par rapport à une armature en acier conventionnel.

Sur le plan mécanique, les tirants avec armature recouverte d'une gaine isolante n'ont pas fissuré, dû à un glissement important de la barre dans le béton. En effet, la présence de la gaine rend l'armature lisse (**Figure 3a**), ce qui entraîne la perte de l'effet des crénelures sur l'adhérence avec le béton. En ce qui concerne les tirants avec armature composite, ils ont présenté des fissures transversales (fissures attendues) plus larges qu'avec les armature en acier ainsi que des fissures de fendage non souhaitées dans le sens longitudinal du spécimen. Finalement, les tirants avec armature en acier recouverte d'époxy ont présenté le patron de fissuration le plus proche des tirants avec armature en acier conventionnel, avec des ouvertures de fissures très légèrement plus grandes. Des exemples de patron de fissuration obtenus en fin de chargement mécanique pour les tirants avec différentes armatures ainsi que les valeurs d'ouverture de la première fissure après son apparition sont donnés à la **Figure 3**. Après déchargement des tirants avec armature recouverte d'époxy, des vérifications ont pu démontrer que le chargement mécanique n'endommageait pas le revêtement époxy au joint des fissures.



**Figure 3** : Types d'armature (a), patrons de fissuration avant plastification de l'armature et ouverture de la première fissure après son apparition  $w$  pour l'armature en acier conventionnel (b), l'armature en acier recouverte d'époxy (c) et l'armature composite (d)

Les essais mécaniques sur les tirants avec armature recouverte d'époxy semblent préférables puisqu'ils présentent un patron de fissuration représentatif de la réalité des structures en béton armé par rapport aux autres alternatives disponibles. Ainsi, des essais de migration ont été effectués sur des tirants avec armature recouverte d'époxy, mais aussi avec une armature composite à titre de comparaison. En effet l'armature composite a l'avantage d'être neutre sur le plan électrique et constitue une référence ne pouvant pas déclencher le processus de corrosion. Trois essais de migration ont donc été effectués pour évaluer l'effet de l'armature : sur un spécimen sans armature, un spécimen avec armature composite et un spécimen avec armature en acier recouverte d'époxy. Ces essais ont été réalisés sur des spécimens de 20 mm d'épaisseur en appliquant un champ électrique de 12 V/cm dans le béton. Les résultats de ces essais sont présentés à la **Figure 4**, ils illustrent l'évolution de la grandeur  $\varepsilon$ , définie précédemment, en fonction du temps.



**Figure 4 :** Effet de la présence d'une barre composite ou d'une barre en acier recouverte d'époxy sur le coefficient de diffusion des chlorures (pente de la courbe).

Les pentes des trois courbes présentées à la **Figure 4**, qui sont les coefficients de diffusion des 3 spécimens, sont très proches avec une augmentation de 16 % pour l'armature en acier recouverte d'époxy et de 11 % pour l'armature composite, en comparaison avec le spécimen de référence sans armature. Cette variation est jugée raisonnable étant donné la variabilité habituelle retrouvée d'un spécimen de béton à l'autre. Les temps d'initiation de la diffusion, correspondant à l'intersection des courbes avec l'abscisse, sont plus faibles pour les spécimens avec armatures que pour le spécimen de référence. Enfin, aucun phénomène de corrosion n'a été observé le long de l'armature en acier recouverte d'époxy après l'essai de migration.

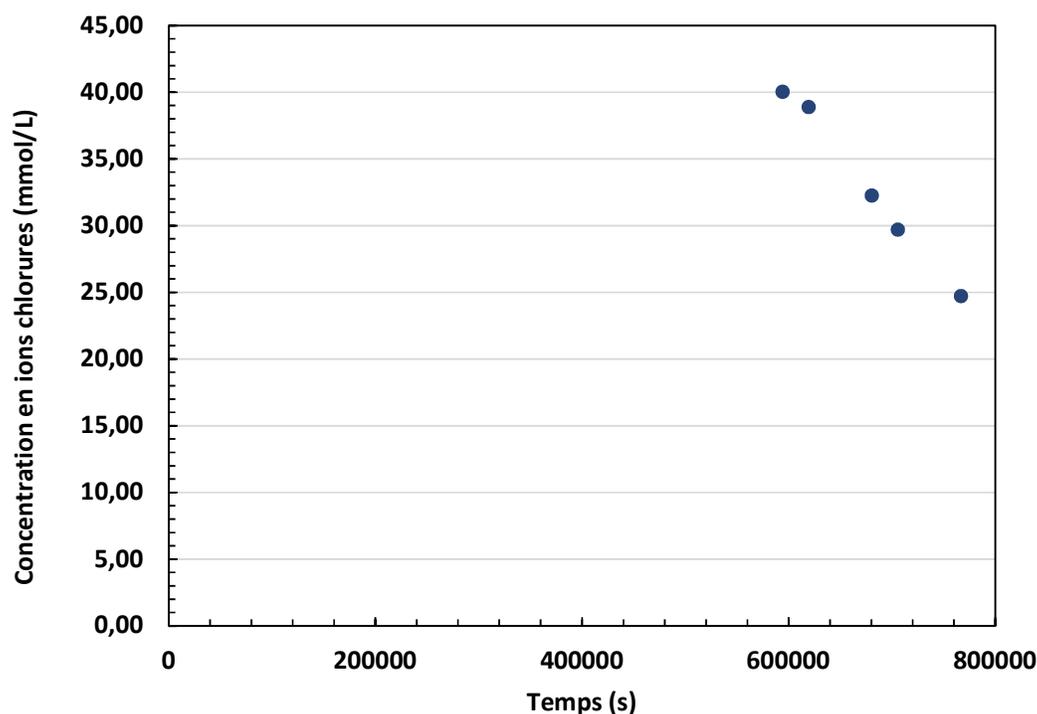
Par conséquent, il semble que la présence d'une armature en acier recouverte d'époxy ou d'une armature composite ait un effet négligeable sur la détermination du coefficient de diffusion des chlorures. Au vu des résultats mécaniques satisfaisants du tirant avec armature en acier recouverte d'époxy, ce type

d'armature est donc sélectionné pour les essais finaux d'essai de migration sur tirant fissuré. Lors de ces essais, une attention particulière sera portée à la qualité du revêtement époxy afin que celui-ci ne comporte aucun défaut pouvant induire la corrosion par piqûre à l'endroit du défaut.

## 5 Effet du voltage et de l'épaisseur sur l'essai de migration

En plus de la présence d'une armature dans les tirants, la section des tirants doit être choisie de telle sorte à représenter un enrobage réaliste retrouvé dans les structures en béton armé exposées aux ions chlorures. Ceci implique une dimension de spécimen plus importante que celle généralement utilisée pour les essais de migration. Il est également important de vérifier si le voltage appliqué durant les essais de migration devrait être ajusté en fonction de l'épaisseur du spécimen.

Dans la littérature, les essais de migration sont majoritairement réalisés sur des spécimens ayant une épaisseur variant de 5 à 50 mm et un champ électrique dans le béton variant entre quelques volts et une vingtaine de volts par centimètre [1,5,6,8,9]. Pour l'essai final de ce projet, il a initialement été envisagé de travailler sur des tirants ayant une section de 100 mm par 100 mm, afin d'avoir un enrobage d'environ 45 mm. Un essai de migration a donc été mené sur un spécimen de référence non armé de 100 mm d'épaisseur. Lors de cet essai, le champ électrique maximal pouvant être appliqué avec le matériel à disposition au laboratoire était de 8,5 V/cm. L'évolution de la concentration des ions chlorures dans le temps, dans la solution en aval du spécimen, est présentée sur la **Figure 5**.

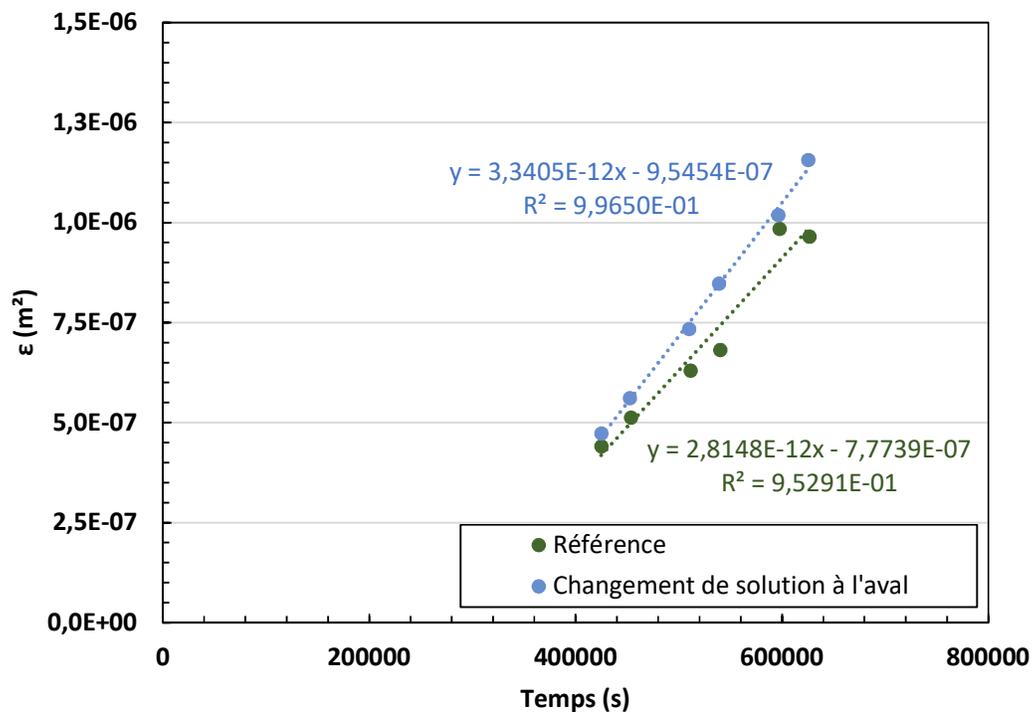


**Figure 5** : Évolution temporelle de la concentration en ions chlorures dans le compartiment aval pour un essai de référence (épaisseur 100 mm, champ électrique 8,5 V/cm)

La **Figure 5** montre une diminution de la concentration en ions chlorures dans le temps, au lieu d'une augmentation attendue à mesure que les chlorures traversent le spécimen. Cette diminution peut s'expliquer par la formation de dichlore ou d'hypochlorites dans le compartiment aval, qui consomment les ions chlorures. Bien que ces deux espèces chimiques ne puissent pas être détectées par titration, leur présence semble confirmée par la forte odeur de chlore se dégageant du compartiment aval. Ces réactions électrochimiques de transformation des chlorures ont déjà été observées dans la littérature et sont provoquées par un potentiel électrique trop élevé dans le compartiment aval, qui fait basculer l'équilibre chimique vers une présence des composés chlorés plutôt que des chlorures [8].

Plusieurs solutions sont possibles pour empêcher la formation de composés chlorés pendant ces essais. Il est possible de diminuer le voltage imposé, ceci réduit par conséquent le potentiel d'électrode dans le compartiment aval. Néanmoins, ce potentiel d'électrode varie pendant l'essai du fait des transferts d'ions et peut se retrouver trop élevé pendant l'essai alors qu'il ne l'est pas au début. Cette solution peut donc être couplée avec le changement de solution aval à intervalle régulier [5]. Ces deux solutions ont donc été testées. Il a cependant été décidé de réduire l'épaisseur des spécimens durant ces essais puisqu'il est attendu que la diminution du voltage allonge le délai avant l'obtention du régime permanent et donc la durée des essais.

Deux essais de migration ont donc été réalisés sur des spécimens sans armature de 85 mm d'épaisseur, en diminuant le champ électrique imposé dans le béton à 6,5 V/cm. Dans le spécimen de référence, la solution dans le compartiment aval n'a pas été changée, tandis que pour l'autre spécimen, la solution a été changée 5 jours après le début de l'essai. Lors du début des essais de migration, les spécimens étaient âgés de 28 jours. La **Figure 6** illustre l'évolution temporelle de la grandeur  $\varepsilon$  au cours de ces deux essais.



**Figure 6** : Évolution temporelle de la grandeur  $\varepsilon$  pour un essai de référence et un essai avec renouvellement de la solution à l'aval (épaisseur 85 mm, champ électrique 6,5 V/cm)

Dans les deux cas, il est possible d'observer une augmentation de la concentration en ions chlorure, en comparaison à la diminution observée à la **Figure 5**. Ceci confirme l'effet bénéfique de la diminution du champ électrique lors de ces essais. Aussi, la courbe bleue, correspondant à l'essai avec le renouvellement de la solution dans le réservoir aval du dispositif, est très linéaire avec un coefficient de détermination supérieur à 0,99. Cet essai avec un renouvellement de la solution avale ne présente aucune diminution de concentration dans le temps. De son côté, la courbe de l'essai de référence, en vert, est moins linéaire avec un coefficient de détermination plus faible de 0,95. De plus, le dernier point de cette courbe a une valeur de  $\varepsilon$  plus faible que le point précédent, ce qui semble indiquer un possible début de diminution de la concentration en ions chlorures dans le compartiment aval. Une telle diminution impliquerait un début de formation des composés chlorés.

Il semble donc que la combinaison de la diminution du voltage imposé et du renouvellement de la solution dans le compartiment aval du dispositif de diffusion permette des mesures fiables du coefficient de diffusion sur des spécimens plus épais que ceux habituellement utilisés pour ce type d'essai. Ces mesures permettent d'éviter la formation de composés chlorés. La diminution de l'épaisseur du spécimen permet également de ne pas rallonger la durée de l'essai suite à la diminution de la tension aux bornes du béton.

## 6 Conclusion

Ce projet de recherche a pour objectif de comprendre le rôle de la micro- et macro-fissuration sur la diffusion des ions chlorures dans les structures en béton armé dans les conditions de service. Afin de parvenir à une compréhension des phénomènes, des essais de migration des chlorures sous champ électrique en régime permanent seront réalisés sur un tirant en béton armé sollicité en traction. Puisque les tirants comportent une armature et que leur épaisseur est grande car représentative de l'enrobage dans une structure, la mise en place des essais nécessite des modifications par rapport à la norme NT Build 335 [6], dont les résultats sont rappelés ci-après.

La réalisation d'un essai de migration accélérée sur un béton armé d'une armature en acier conventionnel entraîne la corrosion rapide et forte de la barre. L'utilisation d'une armature en acier recouverte d'époxy semble être un bon substitut de l'armature en acier conventionnel pour obtenir un comportement mécanique très proche tout en évitant la corrosion de l'armature durant les essais de migration. Un essai de migration effectué sur un spécimen armé d'une armature en acier recouverte d'époxy a donné un coefficient de diffusion très proche de celui du même béton non armé.

Dans ce projet, il est prévu de réaliser les essais de migration sur des tirants dont la section doit être représentative d'un enrobage rencontré sur les ouvrages exposés aux ions chlorures. L'épaisseur des tirants est donc supérieure aux épaisseurs généralement utilisées dans la littérature et dans les normes d'essais de migration accélérée. Le champ électrique généralement utilisé dans la littérature pour des essais de migration se situe autour d'une dizaine de volts par centimètre [6,8,9]. Considérant l'épaisseur des tirants de ce projet, cette recommandation entraîne des voltages très élevés pouvant induire la formation de composés chlorés dans la solution du compartiment aval. La formation de tels composés ne permet pas de définir adéquatement le coefficient de diffusion des ions chlorures. Pour l'éviter, il semble requis de diminuer la tension imposée au spécimen d'essai. Un champ électrique égal à 6,5 V/cm semble adéquat d'après les essais préliminaires réalisés sur des spécimens de 85 mm d'épaisseur, bien qu'il semble rester un risque de formation des composés chlorés après un certain temps si la solution dans le compartiment aval n'est jamais renouvelée. La combinaison gagnante pour éviter la formation

de composés chlorés semble donc être de diminuer le voltage appliqué et de renouveler la solution dans le compartiment aval. Les essais qui seront réalisés sur des spécimens fissurés permettront de valider ces paramètres d'essai. Par la suite, des vérifications concernant l'influence des cellules de diffusion les unes sur les autres ainsi que le maintien de la charge en dehors de la presse seront également réalisées.

Les essais de migration accélérée permettent la mesure du coefficient de diffusion effectif des chlorures, soit leur transport dans un béton saturé en eau, pendant le régime permanent, et sans fixation des chlorures dans la matrice cimentaire. En réalité, dans les structures, le régime transitoire est la phase la plus critique pour les armatures, puisque c'est à ce moment que s'initie la corrosion. Les chlorures, en plus de réagir avec les armatures, ont également la capacité de se fixer à la matrice cimentaire pour former des sels de Friedel. La mesure du coefficient de diffusion effectif dans des conditions de laboratoire est donc une approche de la réalité d'une structure et le coefficient de diffusion apparent est plus adapté à la description des phénomènes de diffusion dans le béton. Néanmoins, le présent projet présente deux avancées importantes pour mieux représenter la diffusion des chlorures dans les structures en béton armé. D'une part, la mesure de diffusion est réalisée sous chargement, soit sans la refermeture de la fissuration et de la porosité du béton retrouvée dans les études sur spécimens fissurés après déchargement [2,4,5]. D'autre part, la présence de l'armature dans les tirants reproduit une fissuration plus réaliste des structures, avec une ouverture de fissure le long de l'armature plus faible que dans le reste du spécimen, et la présence de l'interface armature-béton (éventuelle dégradée) qui contribue au processus de diffusion et à la corrosion.

## Références

- [1] T. Sanchez, « Étude comparative de la diffusion d'espèces anioniques et cationiques dans les matériaux cimentaires : étude expérimentale et numérique », Mémoire de thèse, Université de La Rochelle, La Rochelle, 2018.
- [2] M. Ismail, A. Toumi, R. François, et R. Gagné, « Effect of crack opening on the local diffusion of chloride in cracked mortar samples », *Cement and Concrete Research*, vol. 38, n° 8-9, p. 1106-1111, août 2008, doi: [10.1016/j.cemconres.2008.03.009](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.03.009).
- [3] S. Kessler, C. Thiel, C. U. Grosse, et C. Gehlen, « Effect of freeze-thaw damage on chloride ingress into concrete », *Materials and Structures*, vol. 50, n° 2, p. 121, déc. 2016, doi: [10.1617/s11527-016-0984-4](https://doi.org/10.1617/s11527-016-0984-4).
- [4] C. Fu, H. Ye, X. Jin, D. Yan, N. Jin, et Z. Peng, « Chloride penetration into concrete damaged by uniaxial tensile fatigue loading », *Construction and Building Materials*, vol. 125, p. 714-723, oct. 2016, doi: [10.1016/j.conbuildmat.2016.08.096](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.096).
- [5] A. Djerbi, S. Bonnet, A. Khelidj, et V. Baroghel-Bouny, « Influence of traversing crack on chloride diffusion into concrete », *Cement and Concrete Research*, vol. 38, n° 6, p. 877-883, juin 2008, doi: [10.1016/j.cemconres.2007.10.007](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.10.007).
- [6] « Chloride diffusion coefficient from migration cell experiments », NT Build 335, 1997.
- [7] I. Petre-Lazar, « Évaluation du comportement en service des ouvrages en béton armé soumis à la corrosion des aciers, outil d'aide à la décision », Mémoire de thèse, Université Laval, Québec, 2001.
- [8] W. Prince, J.-P. Ollivier, et O. Truc, « Aspects électrochimiques de l'essai accéléré de perméabilité aux ions chlorures », *Materials and Structures*, vol. 32, n° 4, p. 243-251, mai 1999, doi: [10.1007/BF02479593](https://doi.org/10.1007/BF02479593).
- [9] C. C. Yang et S. W. Cho, « The relationship between chloride migration rate for concrete and electrical current in steady state using the accelerated chloride migration test », *Materials and Structures*, vol. 37, n° 7, p. 456, août 2004, doi: [10.1007/BF02481582](https://doi.org/10.1007/BF02481582).