

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

ANALYSE DE L'IMPACT DE L'EXPOSITION AUX CHLORURES SUR LES ÉCHANTILLONS DE BÉTON PLACÉS EN BORDURE DE ROUTE DANS DES CONDITIONS HIVERNALES SÉVÈRES

S. Khani^A, D. Conciatori^A, L. Chouinard^B

A: Department of Civil Engineering and water Engineering, Laval University, Canada

B: Department of Civil Engineering, McGill University, Canada

RÉSUMÉ : La prolongation de la durée de vie des structures exposées aux sels de déverglaçage pendant les périodes hivernales s'étudie avec l'impact de la corrosion de l'acier d'armature en présence de chlorure. Cette étude vise à évaluer l'impact de la migration du chlorure dans le béton d'enrobage en exposant des échantillons de béton aux sels de déverglaçage et en mesurant des profils de pénétration du chlorure qui en résultent sur deux périodes hivernales. Les données environnementales et chimiques collectées sont utilisées pour évaluer la façon dont l'emplacement, tel que la distance et la hauteur des échantillons de béton par rapport au bord de la chaussée, affectent la migration des chlorures. Le modèle TransChlor[®] utilise des données d'exposition à partir des données météorologiques pour considérer les conditions de bord, considérant ainsi les événements météorologiques locaux et les conditions d'exposition. De plus, le modèle d'exposition TransChlor[®] inclut des données provenant de la littérature et de mesures réelles de la concentration de chlorure causées par les éclaboussures. Cette amélioration permet de raffiner la prédiction de la migration des chlorures dans le béton sous diverses conditions de cure. Les résultats de cette étude permettront de mieux prévoir la durée de vie des structures en béton exposées aux vraies conditions d'exposition aux sels de déverglaçage.

1 INTRODUCTION

Pour garantir la durabilité et la sécurité des structures en béton armé exposées au sel de déverglaçage, il est essentiel de lutter contre la corrosion de l'acier d'armature causée par le chlorure et les dommages causés par le gel. Des modèles fiables sont nécessaires pour décrire la façon dont les chlorures migrent dans le béton dans de telles conditions [1-3]. Ces modèles jouent également un rôle essentiel dans l'évaluation de la durée de vie des structures renforcées existantes. Ils aident à déterminer le moment où la corrosion des armatures s'initie, ainsi qu'à identifier les dommages internes causés par le gel et l'écaillage dû au gel. Ces modèles doivent être robustes, crédibles et fondés sur des principes physiques et chimiques solides. En outre, ils doivent être validés à l'aide de données obtenues à partir de structures en béton sous conditions réelles d'exposition durant de longues périodes. Les résultats mesurés sur ces structures peuvent valider les paramètres du modèle pour une approche basée sur la performance, permettant des choix de conception rationnels, encourageant l'innovation dans la construction en béton et offrant des méthodes efficaces pour évaluer l'état de la structure telle qu'elle a été construite à l'origine [4].

Les modèles de transport pour le béton sont nombreux et prennent en général en considération des modèles de diffusion de vapeur d'eau, de succion capillaire de l'eau liquide avec et sans chlorures, de transfert thermique et de diffusion du dioxyde de carbone. Certains modèles considèrent les interactions chimiques à l'intérieur du béton (par exemple, Stadium®) [2,3], tandis que d'autres considèrent l'environnement et le microclimat de chaque élément des structures (par exemple, TransChlor®) [4,5]. Peu de modèles considèrent la fissuration du béton [8,9]. La validation de certains autres modèles, comme le modèle probabiliste DuraCrete et le modèle ClinConc, a été étudiée. Sur la base de ces études [10,11], il a été constaté que le modèle ClinConc est plus performant que les autres modèles. Cette modification a été appliquée dans le modèle ClinConc en redistribuant le chlorure lié dans la zone proche de la surface pour faire correspondre les résultats expérimentaux avec ceux obtenus par le modèle [12]. Cependant, cette modification ne peut pas être généralisée pour tous les types de liants, car les valeurs constantes dans ses équations ont été obtenues par une "approche d'essai et d'erreur" pour mesurer le profil de chlorure conformément aux résultats expérimentaux.

Dans cette étude, le modèle TransChlor® est validé à l'aide d'échantillons réels placés aux abords de la chaussée. Ces échantillons de béton ont été exposés aux sels de déglacage sur le campus de l'Université Laval à Québec durant deux hivers 2020-2021 et 2022-2023. La rigueur des deux hivers a nécessité une utilisation intensive de sels de déverglacage sur la route pour le déglacage. Les profils des chlorures dans ces spécimens de béton ont été mesurés après 1 et 2 hivers d'exposition, et les résultats du troisième hiver d'exposition sont en cours d'analyse. Ces données permettent d'évaluer l'impact de la distance, de la hauteur depuis le bord de la chaussée. De plus, le modèle d'exposition dans TransChlor® a été raffiné pour améliorer la prédiction de la migration des chlorures dans le béton avec différentes conditions de cure.

2 STATION DE MESURE DE L'EXPOSITION SUR LE TERRAIN

2.1 Station météorologique et mesures du brouillard salin

Une station météorologique mobile, appelée MexStUL, a été développée et placée sur le même site du campus de l'Université Laval (46°46'52,2"N 71°16'02,5"W) que les échantillons pour recueillir des informations sur diverses conditions climatiques et environnementales à l'aide de multiples capteurs. La station recueille des données sur les paramètres climatiques locaux tels que la température de l'air, l'humidité relative et le rayonnement solaire, etc., toutes les 2 minutes depuis 2021. La station est équipée de trois capteurs de brouillard salin placés à différentes hauteurs (1,5 m, 2 m et 2,5 m) dans la direction du vent dominant. Une étude antérieure [13] renseigne sur les concentrations de chlorure résultant de l'exposition au brouillard salin. Les niveaux de chlorure C_{spray} ($mg/m^2/jour$) sont mesurés sur 4 périodes hivernales (2019-2023) par l'intermédiaire d'un capteur développé pour les conditions hivernales, inspirée des bougies humides.

2.2 Échantillons de béton

La recette du béton confectionnant les échantillons est illustrée au tableau 1. Les échantillons sont placés immédiatement dans une pièce humide pour une cure de 28 jours. Après le processus de durcissement, les cylindres sont sciés pour obtenir des morceaux en forme de disque, mesurant 100 mm de diamètre et 30 mm d'épaisseur. Ces spécimens poursuivent deux cures différentes, à savoir 100% et 65% d'humidité relative pendant 28 jours. Les spécimens sont placés dans des supports, chaque support pouvant accueillir jusqu'à 6 échantillons, puis suspendus sur un échafaudage à différentes hauteurs. Ces spécimens sont ainsi scellés, favorisant ainsi une migration unidirectionnelle dans les échantillons.

Tableau 1 Proportion volumétrique de la recette de béton.

E/C	Ciment (kg/m^3)	Eau (kg/m^3)	Fins (kg/m^3)	Grossier (kg/m^3)	Vol. Air (%)
0.55	374	168	798	940	5.5

Les spécimens sont placés en bordure de route pour favoriser trois types d'exposition différents : éclaboussures, brouillard et conditions stagnantes. Un échafaudage est érigé sur le site de l'Université Laval Figure. 1 (à côté de MexStUL. Les six supports ont été stratégiquement positionnés à des hauteurs de 0,5, 1, 1,5, 2, 2,5 et 3 mètres, parallèlement à la route à une distance de 3 m de la chaussée. À cette position, l'impact de l'exposition aux éclaboussures devrait être important, surtout à faible hauteur et au-dessus d'une hauteur de 2 mètres, l'exposition au brouillard devient plus pertinente. Trois plaques ont été installées à 1,5, 2 et 2,5 mètres pour observer les effets de l'exposition au brouillard, à une position différente, à 6 mètres par rapport au bord de la chaussée. Ces supports sont positionnés parallèlement aux capteurs de brouillard, qui sont orientés dans la direction préférentielle du vent. Pour l'exposition à l'eau stagnante, les échantillons sont placés en dessous d'une grille d'évacuation de l'eau sur la surface de la chaussée. Les détails de toutes ces conditions d'exposition sont présentés dans la Figure. 1.



Figure. 1 Localisation des échantillons.

3 MESURE DES PROFILS DES CHLORURES

Après le premier et le deuxième hiver, un tiers environ des spécimens situés à différentes positions ont été démontés et soigneusement placés dans des sacs en plastique scellés. Ces sacs ont ensuite été transportés au laboratoire pour déterminer le profil des chlorures. Les spécimens restants ont été laissés sur place jusqu'aux années suivantes. Les profils de chlorure sont obtenus par l'analyse de la poudre provenant de l'extraction à différentes couches dans le béton d'enrobage. La profondeur de chaque couche est mesurée avec une précision de 1 mm par extraction à sec avec une lame diamantée. Les chlorures sont extraits de la poudre avec une solution d'acide nitrique (HNO_3) avec un niveau de pureté de $69\% \pm 1\%$. Ensuite, la concentration de chlorure dans chaque couche est déterminée par titrage à l'aide d'une solution de nitrate d'argent (AgNO_3). Les résultats obtenus des deux premiers hivers sont présentés dans la Figure. 2.

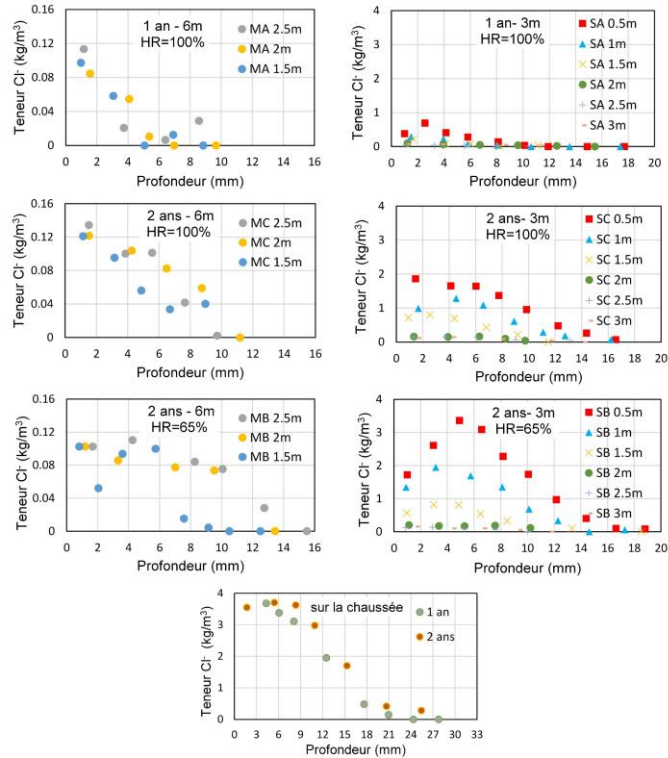


Figure. 2 Profils des chlorures dans les échantillons après 1 et 2 ans d'exposition.

L'impact de la hauteur et de la distance sur la migration des chlorures est illustré dans la Figure. 2. La concentration en chlorure est plus élevée à des niveaux plus bas. Selon des recherches antérieures [10], compte tenu de la vitesse de circulation moyenne de 50 km/h sur la route étudiée, les échantillons de moins de 2 mètres sont plus susceptibles d'être exposés aux éclaboussures. En outre, il n'y a pas de disparité significative dans les valeurs de chlorure observées à des niveaux plus élevés ou à des distances plus grandes. Après 1 et 2 ans d'exposition, il n'y a pas de différence notable dans la teneur en chlorure pour les échantillons situés à une distance de 6 mètres. Toutefois, une pénétration plus importante du chlorure est observée avec un temps d'exposition plus long, en particulier pour les échantillons situés à des niveaux à des niveaux plus bas et à des distances plus courtes, qui sont censés être sous une exposition par éclaboussures. De plus, la profondeur de migration des chlorures augmente avec les durées d'exposition plus longues. Pour les échantillons avec un séchage durant leur cure, la cinétique de migration du chlorure dans le béton est accélérée. Après 2 ans, une humidité relative (HR) plus faible correspond à une teneur en chlorure plus élevée à la même profondeur, ce qui correspond à une étude précédente [11] (Figure. 2). Le pic observé dans les profils de chlorure dans le béton est souvent attribué à l'effet des cycles de mouillage-séchage dans la solution porale, comme visualisé dans plusieurs études [12,13]. La succion capillaire joue un rôle important dans le transport des chlorures dans le béton, en particulier lorsque l'humidité relative est faible dans les pores, ce qui accentue fortement la succion capillaire [11]. Ce processus rapide de migration est évident dans les profils de chlorure des échantillons à de bas niveaux sous une condition d'exposition aux éclaboussures, en particulier pour les échantillons avec un séchage initial de 65% et moins important pour une cure humide à 100%. Dans la Figure. 2, "M" se réfère à l'échantillon à une distance de 6 mètres, "S" à une distance de 3 mètres. "A" indique la première exposition hivernale, "C" la deuxième année d'exposition, et "D" correspond aux échantillons sur la route. De plus, "B" désigne l'échantillon avec un séchage durant la cure.

4 MODÉLISATION DE LA CONCENTRATION DE CHLORURE AVEC UNE EXPOSITION AUX ÉCLABOUSSURES ET AU BROUILLARD SALIN

Les sels de déverglage appliqués sur la surface des chaussées en hiver entraînent un processus en trois étapes de dispersion d'ions chlorure sur les surfaces : application initiale de sels avec une saleuse, formation d'un film contenant des chlorures sur la surface de la chaussée par la fonte de la neige et de la glace et, enfin, dispersion de la saumure depuis la surface de la chaussée vers l'extérieur par éclaboussures et brouillard salin. Les éclaboussures sont émises par l'action des véhicules qui passent, pulvérisant et éclaboussant la saumure [14]. Lundmark [15] a effectué une analyse du modèle de concentration des chlorures en bordure d'autoroute. De plus, Blomqvist [16] a étudié la dispersion dans l'air des sels de déverglage, en tenant compte des mécanismes d'éclaboussure et de brouillard salin, et l'a décrite à l'aide d'une fonction exponentielle. Cette fonction a permis d'évaluer la concentration des chlorures en fonction de la distance par rapport à la chaussée. De plus, la concentration des chlorures peut également être influencée par la direction des vents dominants [15,16]. De plus, les éclaboussures générées par les véhicules, le nombre de véhicules et leur vitesse jouent un rôle important dans la concentration de chlorure. Pour déterminer le lieu géométrique affecté par l'exposition aux éclaboussures due à la circulation, un modèle a été proposé [18] prenant en considération la hauteur maximale et l'étendue latérale de la zone d'éclaboussures en fonction de la vitesse des véhicules.

L'objectif de cette section est de déterminer la fonction qui décrit le dépôt de chlorure le long de la route. La concentration de chlorure provenant du brouillard chargé de sel sur une route locale C_{spray} ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{jour}$) avec une limitation de vitesse de 50 km/h a été analysée en fonction de plusieurs facteurs : masse d'air totale V_w (m^3/jour), nombre de véhicules, surface exposée par jour (m^2), et la quantité moyenne de sel sur la route R_s (g/m^2) pendant la période d'exposition. Les données obtenues grâce au monitoring sont présentées dans le Tableau 2.

Tableau 2 Monitoring et données calculées sur la période d'exposition.

R_s (g/m^2)	N_v/jour	V_w (m^3/jour)	C_{spray} ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{jour}$)	Temps d'exposition
2500	3015	9499.35	6.74	2019-12-05 à 2020-02-21
2375	1198	8748.67	3.05	2020-12-04 à 2021-02-19
1735	2457	5454.05	4.8	2021-12-03 à 2022-02-24
640	1583	10564	1.98	2020-02-28 à 2020-04-16
2950	1936	9668.97	1.46	2021-03-09 à 30-04-2021
1173	4234	7799.35	4.88	2019-02-05 à 2019-04-16
2570	3317	11936.47	1.83	2021-03-09 à 2022-04-30

Un modèle de régression (Éq. 1) est appliqué aux données du Tableau 2, considérant le nombre de véhicules N_v et la quantité de sel appliquée sur la route R_s (g/m^2) avec une bonne corrélation ($R^2=0.98$). L'impact du vent s'observe sur un profil transversal de la route où la concentration du sel s'atténue avec l'éloignement de la route. Pour les éprouvettes sur le site, les mesures ont été effectuées à deux distances différentes, soit 3 m et de 6 m de la route. La concentration de chlorure, résultant de l'exposition aux brouillard C_{spray} ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{jour}$), est vérifiée également à partir de données provenant d'une étude antérieure [15]. Le modèle est ainsi validé pour les deux distances spécifiques sur le profil en travers de la route avec l'**Error! Reference source not found.**, provenant des travaux de Blomqvist [13]. Le sel le plus couramment utilisé pour les opérations de déverglage est le chlorure de sodium (NaCl) jusqu'à des températures de -20°C . Le rapport de masse molaire entre le chlorure et le NaCl de 0,61 (35,45 g/mol / 58,44 g/mol) apparaît dans les autres équations. Le rapport R_{spray} entre les concentrations de chlorure transporté par les éclaboussures et la concentration initiale de chlorure sur la chaussée est présenté dans l'**Error! Reference source not found.**

$$C_{s\text{pray}} = 1.27 + 7.66 * 10^{-7} N_v * R_s \quad 1$$

$$C_{s\text{pray-cal}} = (1.71 + 10.33 * 10^{-7} N_v * R_s) * e^{-0.05x} \quad 2$$

$$R_{s\text{pray}} = \frac{C_{s\text{pray-cal}}}{\frac{0.61 * 10^3 * R_s}{n}} \quad 3$$

L'**Error! Reference source not found.** intègre la vitesse du véhicule (v) et la distance maximale des éclaboussures par rapport à la route (x) provenant des équations développées dans [13]. Ainsi cette dernière équation, la concentration de chlorure résultant de l'exposition aux éclaboussures, est exprimée en fonction de la distance de la route x (m), de la quantité de sel sur la route R_s / n (g/m²/jour) et de la vitesse des véhicules v (km/h). Le rapport $R_{s\text{splash}}$ entre le de la concentration de chlorure provenant des éclaboussures et la quantité initiale de chlorure sur la chaussée, $R_{s\text{splash}}$, est présenté dans l'Éq. (5). La quantité totale de chlorure rapporté à la quantité de sel sur la chaussée s'obtient par l'addition de $R_{s\text{spray}}$ et $R_{s\text{splash}}$, soit $R_{\text{tot}} = R_{s\text{spray}} + R_{s\text{splash}}$.

$$C_{s\text{plash}} = 0.985 * \frac{0.61 * 10^3 * R_s}{n} * e^{\frac{-1.656x}{v^{0.2548}}} \quad 4$$

$$R_{s\text{plash}} = \frac{C_{s\text{plash}}}{\frac{0.61 * 10^3 * R_s}{n}} = 0.985 * e^{\frac{-1.656x}{v^{0.2548}}} \quad 5$$

5 MODÈLE TRANSCHLOR

Le modèle TransChlor® prédit la migration temporelle des ions chlorure dans les éléments en béton armé [3]. Un modèle climatique explicite reproduit l'exposition pour chaque élément structural aux conditions hivernales et environnementales, comprenant la température, l'humidité relative, les précipitations et l'utilisation de sel de déverglaçage sur les surfaces routières, agissant comme conditions de bord du modèle. Les incertitudes liées aux propriétés des matériaux sont prises en considération avec une approche probabiliste pour diffuser la variabilité des paramètres dans le modèle et obtenir la distribution des concentrations d'ions chlorure dans le béton sous forme probabiliste [19]. Il considère la carbonatation, le transfert thermique, la succion capillaire en présence d'eau liquide (pluie), la diffusion hydrique (humidité relative) et des ions chlorure et leur adsorption par la pâte de ciment. Les processus de transport des ions chlorure sont unidirectionnels et donc les équations de transport sont développées en 1D. Le modèle utilise la méthode des éléments finis pour résoudre la partie spatiale et la méthode des différences finies pour la partie temporelle. Il est possible de déterminer tous les paramètres de diffusion dans le milieu poreux en connaissant la perméabilité du béton provenant d'essais en laboratoire [20] ou directement avec des essais non destructifs [21].

Le modèle climatique et environnemental du logiciel TransChlor® classe l'exposition de la structure selon la présence de la vapeur d'eau et des précipitations. L'eau liquide entre en contact avec la structure en périodes de précipitations sous certaines conditions d'exposition, alors que la vapeur d'eau est toujours présente avec les valeurs de l'humidité relative dans l'air. Le modèle considère l'eau liquide 100% d'humidité relative dans les conditions de bord, alors que la vapeur d'eau saturée ne peut pas dépasser 99,9%. Ainsi, trois classes d'exposition principales ont été définies : (a) Exposition directe – la surface du béton est immédiatement en contact avec l'eau liquide lorsque les précipitations commencent. Si les précipitations se terminent la nuit, la surface reste mouillée en présence d'eau liquide jusqu'au matin pour tenir compte d'un séchage lent sur la surface. La variation du temps de séchage est importante dépendant du type d'éléments (défauts

d'étanchéité, les joints de dilatation, stagnation d'eau proche de bordure, défaut d'évacuation d'eau, etc.) et de la facilité de séchage (zone aérée, ombrée, ensoleillée, etc.). (b) Exposition aux éclaboussures – la surface est en contact avec l'eau liquide une heure après le début des précipitations, en supposant qu'il y ait suffisamment d'eau sur la chaussée pour qu'il y ait des éclaboussures. Le contact avec l'eau liquide cesse lorsque les précipitations cessent. (c) Exposition au brouillard salin – la structure est protégée de l'impact des précipitations et seule l'humidité relative est en contact avec la structure.

La concentration de chlorure de sodium sur la chaussée dépend de la présence ou non d'un film d'eau lors de l'épandage. Lors de l'épandage, plusieurs possibilités peuvent se présenter : pas de chlorure de sodium avec un film d'eau, chlorure de sodium avec un film d'eau ou chaussée sèche. L'épaisseur de la pellicule d'eau sur la chaussée varie de 1 à 2 mm. Lors de l'épandage de chlorure de sodium solide, l'eau est nécessaire pour dissoudre le chlorure de sodium sur la chaussée et sa concentration est de 36% sans film d'eau. En présence d'eau, le chlorure de sodium solide se dissout et se transforme en saumure avec une concentration en chlorure ne dépassant pas 36%. La concentration en sel épandue varie en fonction des précipitations et est identique pour les 3 types d'exposition précités.

5.1 Simulation avec le modèle TransChlor®

Les données climatiques sont collectées à intervalles de 2 minutes avec la station MexStUL (§ 2.1), couvrant la période du 4 décembre 2020 au 16 mai 2022, correspondant à la durée d'exposition de l'échantillon sur le site, soit 163 jours pour le premier hiver et 513 jours pour le deuxième. Les conditions de bord des échantillons proviennent du modèle d'exposition TransChlor® (§ 5). Les caractéristiques du béton d'enrobage comme la porosité [22], le coefficient de diffusion du chlorure (D_{Cl}) [23], le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau (D_{HR}) [24] sont obtenues à partir d'essais en laboratoire (Tableau 3).

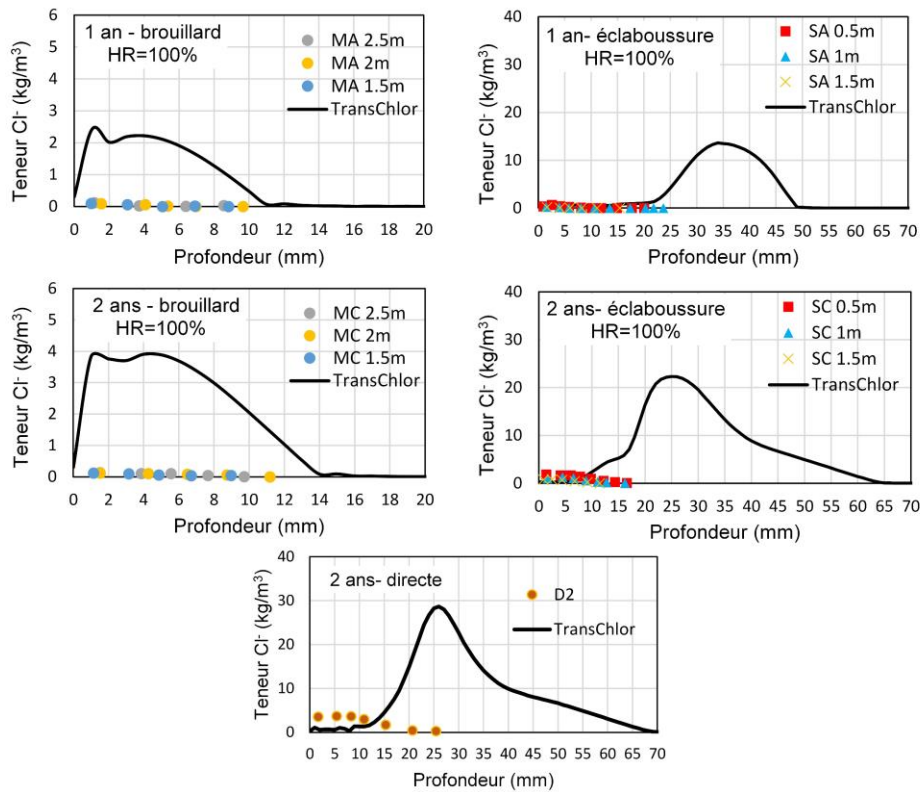


Figure. 3 Profils de chlorure dans les échantillons de béton: mesurés vs simulation avec TransChlor®.

Tableau 3 Propriétés du béton d'enrobage.

Porosité (%)	D_{Cl} (10^{-6} mm ² /s)	D_{HR} (10^{-6} mm ² /s)
16	7.19	210

Les résultats de la simulation des échantillons de béton avec TransChlor®, comparés avec les données réelles sur le site, sont présentés dans la Figure. 3. Les résultats de la simulation surestiment les profils mesurés pour toutes les conditions d'exposition. De plus, cette surestimation se produit pour l'exposition au brouillard ce qui démontre que la concentration de chlorure en contact avec l'éprouvette est surestimé. Par conséquent, une compréhension du modèle physique est nécessaire pour comprendre ce très important écart, ce qui est proposé dans la prochaine section (§ 5.2).

5.2 Nouvelle modification du modèle d'exposition dans TransChlor®

La quantité de sel projetée par des éclaboussures ou dans le brouillard salin est généralement inférieure à la quantité de sel sur la route (cf § 4). Le modèle présenté dans cette section prédit la concentration de chlorure résultant de l'exposition au brouillard salin et aux éclaboussures. Ainsi, la concentration de sel dans TransChlor® a utilisé les équations 3 et 5. La concentration de sel dans TransChlor® a été diminuée en multipliant ses valeurs par R_{tot} .

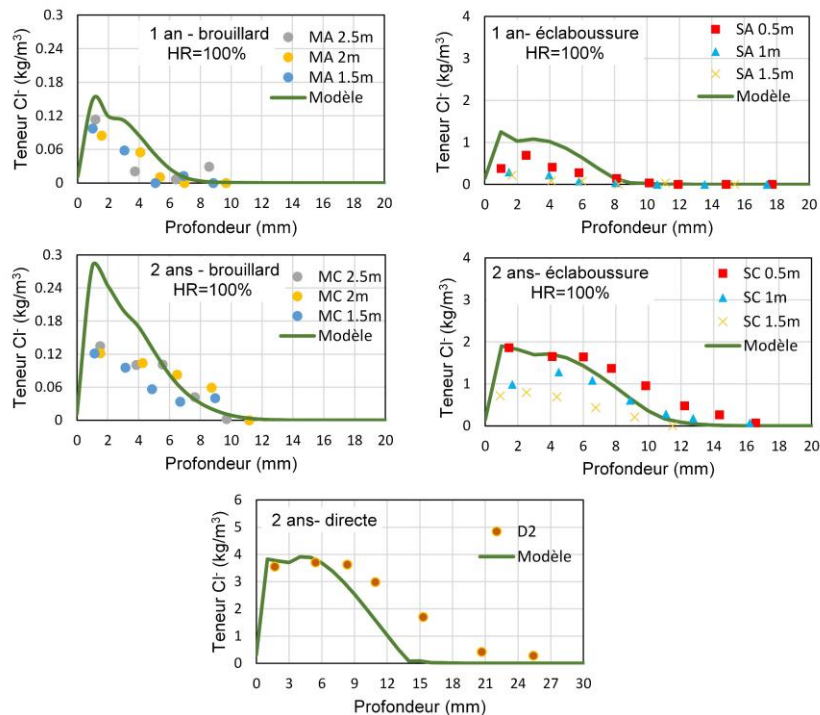


Figure. 4 Profils de chlorure dans les échantillons en béton: mesures sur site et simulation avec TransChlor® avec de nouvelles hypothèses d'exposition et de concentration de chlorure.

De plus, l'hypothèse que les échantillons à 3 m du bord de la chaussée soient sous une exposition aux éclaboussures a été éliminée. Au lieu de cela, l'exposition au brouillard salin a été utilisée permettant un contact avec l'humidité relative ambiante seule, hors contact des précipitations. Cette hypothèse peut s'expliquer par la mise en place d'un nouveau revêtement sans orniérage au début de ce projet. Ainsi les

mesures, faites avec des caméras dans l'étude précédente sur le lieu géométrique des éclaboussures sur une chaussée avec des ornières très marquées, peuvent changer selon la qualité de la chaussée. De plus, il est probable que la basse température des échantillons durant la période hivernale ait congelé l'eau directement lorsqu'elle entre en contact avec l'échantillon provoquant une barrière étanche à toute entrée d'eau par capillarité. Ce dernier argument n'a pas été mesuré dans cette étude, mais semble fort probable, car l'observation des échantillons sous la grille présente une atténuation similaire, mais reste supérieur aux autres expositions. Les résultats avec ces nouvelles hypothèses sont illustrés dans la Figure. 4. Ces résultats montrent l'importance de bien quantifier l'évolution temporelle de la présence de sel sur l'échantillon.

6 CONCLUSION

Dans cet article, deux nouvelles fonctions sont proposées pour prédire la concentration des chlorures dans les éclaboussures et le brouillard salin sur un profil transversal de la route. Ces fonctions intègrent le nombre de véhicules, leur vitesse et la distance depuis le bord de la chaussée carrossable. Ces deux fonctions sont proposées à partir de mesures sur le site et ont été étendues à partir de la littérature existante.

Les profils de chlorure obtenus sur le site montrent que les échantillons proches de la route sont plus sévèrement exposés que ceux plus éloignés. Les échantillons situés à une hauteur en dessous de deux mètres et à une distance de trois mètres de la chaussée présentent des valeurs de chlorure plus élevées, confirmant une plus grande exposition aux éclaboussures et au brouillard. Lorsque la hauteur augmente, la concentration en chlorure diminue. Les échantillons situés à des hauteurs plus élevées et à trois mètres de la route présentent des migrations de chlore proche de ceux situés à 6 mètres, indiquant une exposition au brouillard, proposé par l'Éq. 2. Finalement, la migration des chlorures était plus rapide dans les échantillons avec un séchage en guise de cure.

Le modèle TransChlor[®] est un logiciel et un outil complet intégrant l'exposition à travers la modélisation climatique, environnementale précise, ainsi que les mécanismes de transport pour prédire la migration des ions chlorure dans les structures en béton armé dans des conditions d'exposition variables. Cependant, les résultats obtenus avec le modèle d'exposition standard avec les profils de chlorure sur site différaient notablement de la simulation avec TransChlor[®]. Des hypothèses ont été faites sur ces conditions d'exposition et sur la concentration en sel en contact avec les échantillons montrant la sensibilité du modèle d'exposition sur les prédictions du modèle. Ces hypothèses sur l'exposition permettent de bien comprendre la physique derrière ces différents processus de transport. Ces hypothèses sont en cours de validation dans cette recherche et font l'objet d'études actuelles.

7 RÉFÉRENCES

- [1] G. Rong, T. He, G. Zhang, Y. Li, Y. Wang, and W. Xie, 'A review on chloride transport model and research method in concrete', *Mater. Res. Express*, vol. 10, no. 4, p. 042002, Apr. 2023, doi: 10.1088/2053-1591/accb2a.
- [2] L. O. Nilsson, E. Poulsen, P. Sandberg, H. E. Sørensen, and O. Klinghoffer, 'HETEK, chloride penetration into concrete, state-of-the-art, transport processes, corrosion initiation, test methods and prediction models', *Den. ISSN/SBN*, pp. 0909–4288, 1996.
- [3] D. Conciatori, F. Laferrière, and E. Brühwiler, 'Comprehensive modeling of chloride ion and water ingress into concrete considering thermal and carbonation state for real climate', *Cem. Concr. Res.*, vol. 40, no. 1, pp. 109–118, Jan. 2010, doi: 10/bd9q4n.
- [4] H. Beushausen, R. Torrent, and M. G. Alexander, 'Performance-based approaches for concrete durability: State of the art and future research needs', *Cem. Concr. Res. V119 201905 11-20*, 2019, doi: 10.1016/j.cemconres.2019.01.003.
- [5] E. Samson and J. Marchand, 'Modeling the transport of ions in unsaturated cement-based materials', *Comput. Struct.*, vol. 85, no. 23–24, pp. 1740–1756, Dec. 2007, doi: 10/bhgmm3.
- [6] J. Marchand and E. Samson, 'Predicting the service-life of concrete structures—Limitations of simplified models', *Cem. Concr. Compos.*, vol. 31, no. 8, pp. 515–521, 2009, doi: 10/dftkzp.

- [7] David Conciatori, 'TransChlor: effet du microclimat sur l'initiation de la corrosion des aciers d'armature dans les ouvrages en béton armé',
- [8] S. Jefremczuk, 'Chloride ingress and transport in cracked concrete'. <https://escholarship.mcgill.ca/concern/theses/5712m714x> (accessed May 25, 2023).
- [9] V. Turgeon-Malette *et al.*, 'Chloride ion permeability of Ultra-high-performance fiber-reinforced concrete under sustained load', *J. Build. Eng.*, vol. 66, p. 105842, May 2023, doi: 10.1016/j.job.2023.105842.
- [10] L. Tang and A. Lindvall, 'Validation of models for prediction of chloride ingress in concrete exposed in de-icing salt road environment', *Int. J. Struct. Eng.*, vol. 4, no. 1–2, pp. 86–99, 2013, doi: 10/gjck7p.
- [11] L. Tang, D. Boubitsas, P. Utgenannt, and Z. Abbas, 'CBI BETONGINSTITUTET RISE CBI SWEDISH CEMENT AND CONCRETE RESEARCH INSTITUTE'.
- [12] L. Tang, D. Boubitsas, and L. Huang, 'Long-term performance of reinforced concrete under a de-icing road environment', *Cem. Concr. Res.*, vol. 164, p. 107039, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.cemconres.2022.107039.
- [13] G. C. Keserle, T. Sanchez, D. Conciatori, and L. Chouinard, 'Monitoring Environmental and Climatic Exposure Conditions for Structures in Cold Regions', *J. Cold Reg. Eng.*, vol. 35, no. 2, p. 04021007, Jun. 2021, doi: 10/gh37hg.
- [14] H. Wang, R. Ranade, and P. Okumus, 'Estimating chloride exposure of reinforced concrete bridges using vehicle spray and splash mechanisms', *Struct. Infrastruct. Eng.*, pp. 1–11, Mar. 2022, doi: 10.1080/15732479.2022.2052910.
- [15] A. Lundmark and B. Olofsson, 'Chloride Deposition and Distribution in Soils Along a Deiced Highway – Assessment Using Different Methods of Measurement', *Water. Air. Soil Pollut.*, vol. 182, no. 1, pp. 173–185, Jun. 2007, doi: 10.1007/s11270-006-9330-8.
- [16] G. Blomqvist and E.-L. Johansson, 'Airborne spreading and deposition of de-icing salt – a case study', 1999.
- [17] M. E. R. Gustafsson and L. G. Franzén, 'Dry deposition and concentration of marine aerosols in a coastal area, SW Sweden', *Atmos. Environ.*, vol. 30, no. 6, pp. 977–989, Mar. 1996, doi: 10/bq5d39.
- [18] G. C. Keserle, 'Exposition environnementale des structures en conditions hivernales sur un réseau routier', Université Laval, Québec - Canada, 2020.
- [19] D. Conciatori, E. Brühwiler, and A.-G. Dumont, 'Actions microclimatique et environnementale des ouvrages d'art routiers', *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 36, no. 4, pp. 628–638, Apr. 2009, doi: 10.1139/L09-014.
- [20] D. Conciatori, É. Grégoire, É. Samson, J. Marchand, and L. Chouinard, 'Sensitivity of chloride ingress modelling in concrete to input parameter variability', *Mater. Struct.*, vol. 48, no. 9, pp. 3023–3036, Sep. 2015, doi: 10/f7k363.
- [21] A. S. Bah *et al.*, 'Assessing the condition state of a concrete bridge combining visual inspection and nonlinear deterioration model', *Struct. Infrastruct. Eng.*, pp. 1–16, May 2022, doi: 10.1080/15732479.2022.2081987.
- [22] ASTM International, West Conshohocken, PA, 'ASTM C642-13, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete', 2013.
- [23] 'NT Build 443 – Nordtest Method, Accelerated Chloride Penetration', 1995.
- [24] D. Conciatori, É. Grégoire, É. Samson, J. Marchand, and L. Chouinard, 'Statistical analysis of concrete transport properties', *Mater. Struct.*, vol. 47, no. 1–2, pp. 89–103, Nov. 2014, doi: 10/f5r33z.