

DÉGRADATION DES STRUCTURES EN CONDITION HIVERNALE ET SES LIMITATIONS

G. C. KESERLE, D. CONCIATORI

Département de génie civil et de génie des eaux, Université Laval, Canada

gilberto.cidreira.1@ulaval.ca

david.conciatori@gci.ulaval.ca

RÉSUMÉ

La dégradation des structures est une problématique constante où les coûts de réhabilitation annuels peuvent atteindre des milliards de dollars en Amérique du Nord. Les coûts indirects, comme les retards dus aux embouteillages et à la perte de productivité résultants de l'entretien des ponts et aux remplacements des structures, augmentent de plus de dix fois le coût direct lié aux détériorations des ouvrages. Des modèles performants permettent de déterminer la durée de vie restante d'un élément ou d'une structure en considérant la résistance des structures à la corrosion et les mécanismes de détérioration de manière quantitative. Ces mécanismes de détérioration dépendent du climat ambiant et de l'environnement qui sont essentiels afin d'établir la fiabilité des méthodes de conception liées à la performance structurale. L'Ontario et le Québec sont les provinces qui utilisent le plus de sel de déverglaçage pour la sécurité des usagers pendant la période hivernale. Ces types de sel contiennent des ions chlore et qui migrent dans la solution interstitielle du béton armé jusqu'au niveau des aciers d'armature et les corrodent lorsqu'ils se trouvent en quantité suffisante. La vitesse de diffusion des ions chlore dépend directement de l'exposition de la structure au climat et au sel de déverglaçage. Cette étude vise à montrer l'influence des conditions environnementales et climatiques dans la dégradation des structures en condition hivernale.

1. INTRODUCTION

Les principales dépenses d'entretien, aux États-Unis, au Canada, au Japon, en Australie ou encore au Royaume-Uni, résultent de la détérioration prématurée des ponts en béton. Les coûts indirects, comme les retards dus aux embouteillages et à la perte de productivité résultants de l'entretien des ponts et aux remplacements des structures, augmentent de plus de dix fois le coût direct liée aux détériorations des ouvrages [1].

Au Québec, la majorité des ouvrages d'art ont été construits dans les années 60 et 70 (*Figure 1*). En considérant la durée de vie de ces structures d'environ 70 ans, on peut s'attendre à ce que dans 10 ans, environ, 67% des ouvrages d'art arrivent en fin de vie [2].

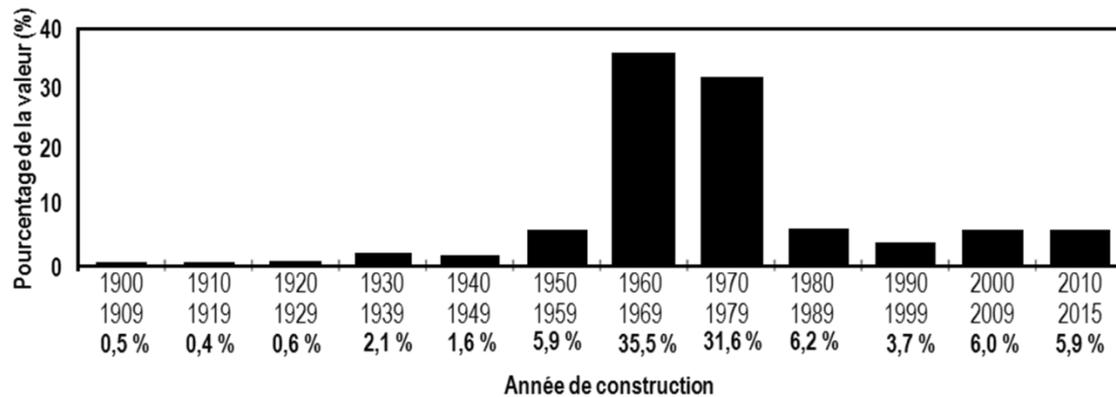


Figure 1 - Évolution des ouvrages d'art à Québec [2].

Les investissements réalisés pour le maintien de l'état du réseau routier ont augmenté de 2.5x depuis les 20 dernières années [2]. Pourtant la majorité de ces investissements, d'environ 87% [3], sont alloués au maintien et à la réhabilitation des structures déjà existantes.

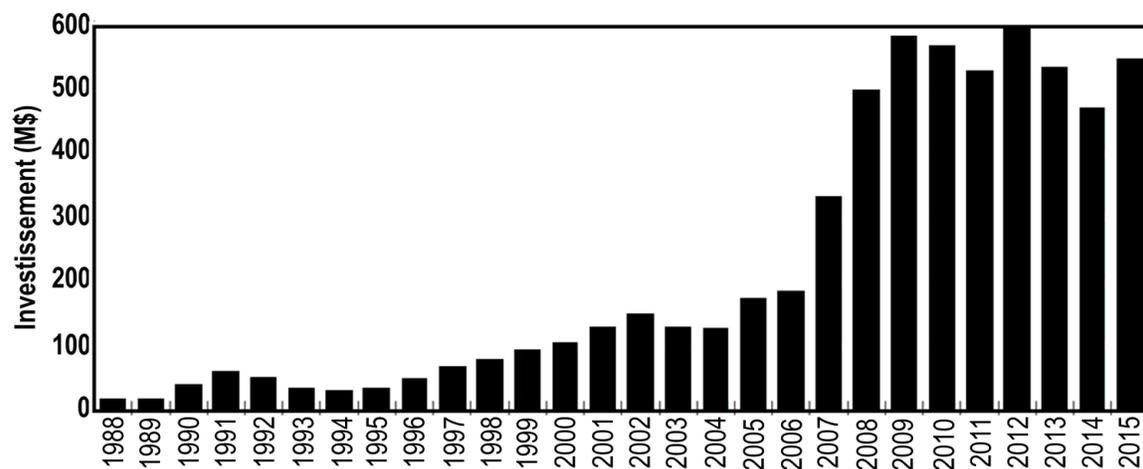


Figure 2 - Investissements aux ouvrages d'art à Québec [2]

Dans cette approche, il est nécessaire d'avoir des structures durables en maintenant leurs performances tout au long de leur vie utile. Dans cette optique, connaître et prédire la vitesse de dégradation des structures deviennent primordial. Les conditions de vie des structures peuvent être influencées par différents facteurs environnementaux:

- la température ambiante ;
- l'humidité relative;
- les facteurs physiques comme le vent, les vagues, l'abrasion des véhicules, etc.;
- les facteurs chimiques comme les polluants industriels, le sel de déglçage, etc.)
- les facteurs biologiques comme les algues, les bactéries, les insectes, etc.;

Tous ces facteurs peuvent être attribués aux conditions météorologiques et à ses variations. Aujourd'hui, il existe un besoin critique d'identifier de manière fiable les actions

environnementales pour la conception d'infrastructures durables dans les régions nordiques. La plupart des sels de déglacage utilisés sont à base de chlorure qui, diffusés dans l'eau, peuvent pénétrer dans le béton d'enrobage et initier le processus de corrosion des armatures en acier.

Des modèles de transport sont souvent utilisés pour modéliser le mouvement des ions chlorure et prédire la concentration au niveau de l'acier d'armature. Plusieurs de ces modèles prennent en considération les dissolutions d'espèces chimiques ou la formation de minéraux, les variations thermiques, hydriques influençant directement le mouvement des ions de chlore dans le béton d'enrobage [4]. De nombreux tests approfondis sont nécessaires pour calibrer les paramètres du modèle [4]. De plus, les modèles de prédictions utilisent des conditions de bord simplifiées, et des calibrations sont nécessaires afin d'obtenir des concentrations de chlore dans les vraies conditions d'exposition des structures [5]. Ce simple fait renforce l'importance d'utiliser les vraies conditions de bord pour obtenir une meilleure prédiction de la dégradation des structures sans calibrer les modèles pour chaque cas étudié.

2. INFLUENCE DE L'EXPOSITION

En Suisse, une étude a été menée [6] dans six différentes régions :

- Davos – région montagneuse;
- Grand-Saint-Bernard (GSB) – région montagneuse;
- Guetsch – région montagneuse;
- Lugano – région de plaine;
- Pully – région de plaine;
- Sion – région de plaine;

Cette étude a recueilli les données climatiques et environnementales des différentes régions afin de simuler l'importance de l'agression des structures en béton par la présence de ions chlore, provenant de l'épandage de sel de déverglaçage. Ces différentes régions présentent différentes conditions environnementales et climatiques différentes (*Figure 3*).

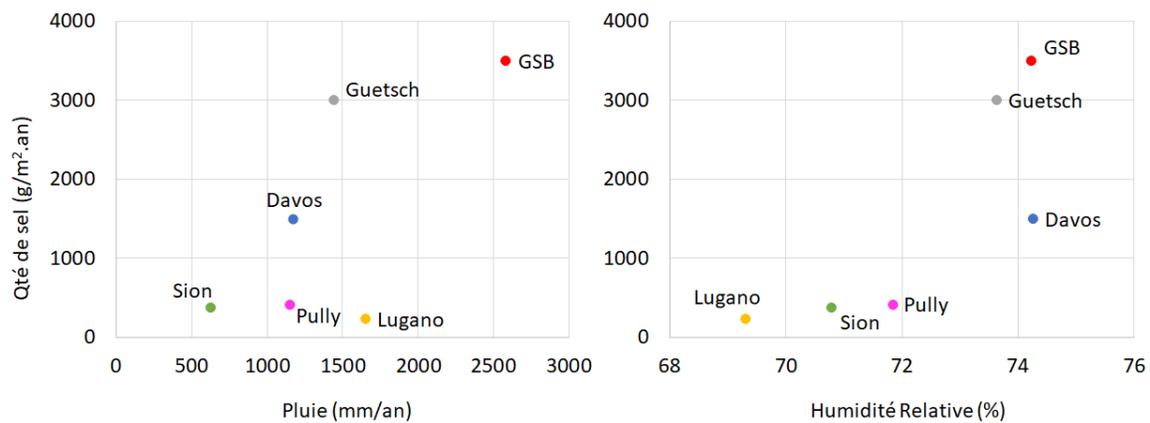


Figure 3 - Condition d'exposition des régions en Suisse [6]

Les données environnementales (quantité de sel de déverglaçage épanché sur la chaussée) proviennent d'une enquête réalisée auprès des autorités de plusieurs régions en Suisse [6], ce qui a permis d'évaluer le temps et la durée de contact des sels sur la structure selon son degré d'exposition. Toutes les prédictions et les analyses d'exposition ont été faites par TransChlor[®] [6]. Les données météorologiques réelles y sont considérées comme conditions aux limites où par exemple le processus de capillarité est pris en considération lorsqu'un élément de structures est directement exposé aux pluies et aux sels. Le modèle prend en considération à la fois l'absorption capillaire et les processus de diffusion afin d'évaluer la migration du chlore dans le béton d'enrobage. Les variations thermiques, hydriques (humidité relative) et les réactions de carbonatation y sont également intégrées dans le modèle. Finalement la variabilité des paramètres du modèles sont inclus afin de proposer à l'utilisateur une démarche probabiliste amenant à la corrosion de l'élément de structure. Finalement, le modèle distingue trois classes d'exposition, soit exposition au brouillard, direct et aux éclaboussures.

Afin d'affirmer que la connaissance de l'exposition des structures à son climat et environnement est un facteur essentiel dans l'évaluation de la détérioration des structures, les considérations suivantes introduisent une analyse plus approfondie ci-après : (1) les régions en montagnes sont plus humides et présentent une humidité relative similaire entre eux, (2) les régions en plaines sont plus sèches et la quantité de sel épanché est équivalente (*Figure 3*). Les régions des régions de montagnes présentent une quantité annuelle de sel épanché sur les chaussées plus élevées que celle des régions en plaine (*Figure 3*).

a. RÉGIONS DE MONTAGNE

En montagne (Davos, GSB et Guetsch), la quantité de sel épanché varie beaucoup plus, soit entre 1497 (Davos) et 3499 g/m².an (GSB). La variation annuelle des précipitations dans ces régions présente également un intervalle conséquent entre 1168 (Davos) et 2579mm (GSB) de pluie. Cependant, l'humidité relative moyenne annuelle ne varie que peu dans ces régions montagneuses (*Figure 3*).

Deux types d'exposition sont visualisés dans cette étude, soit exposition au brouillard salin, zone protégée des pluies et avec une exposition à l'humidité relative sous forme de brouillard salin et exposition aux éclaboussures où l'eau de pluie entre en contact avec la structure par les éclaboussures émises par les véhicules. Ces simulations considèrent le matériau comme sain, exempt de fissurations.

La *Figure 4* présente l'évolution temporelle de la concentration des ions chlore libre dans le béton d'enrobage à 30 mm de profondeur dans une zone d'exposition au brouillard salin. La différence observée entre ces différentes concentrations de chlore est liée principalement à la quantité de sel épanché dans les trois régions. Il est essentiel de se souvenir que le transport ionique se passe uniquement par diffusion, donc beaucoup plus lent que le processus de transport par capillarité. La diffusion des ions de chlore dans le substrat est donc fonction du degré de saturation du matériau [7]. Ce degré de saturation dépend uniquement de l'humidité relative environnante.

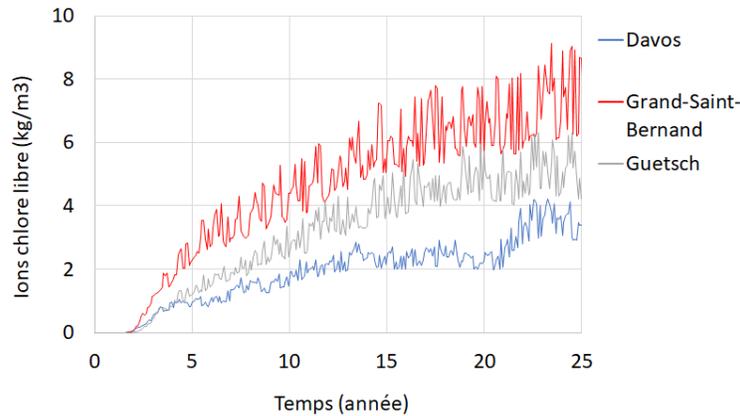


Figure 4 - Évolution temporelle de la concentration des ions chlore au béton exposé au brouillard salin à une profondeur d'enrobage de 30 mm [6].

Le processus de capillarité augmente de façon drastique le mouvement du chlore dans le béton d'enrobage pour l'exposition aux éclaboussures. Ce processus peut se visualiser comme une succion de l'eau, où les ions de chlore sont entraînés par le mouvement rapide de l'eau. Ainsi plus, le béton d'enrobage est sec, plus cet effet de succion capillaire est accentué. Cet effet de succion est donc lié aux durées de séchage, soit les périodes sans précipitation et exposées à l'humidité relative ambiante.

La Figure 5 présente l'évolution ions chlore libres à une profondeur de 30mm et avec une exposition aux éclaboussures. Avec l'ajout de la succion capillaire, l'évolution de la concentration des ions de chlore dans le matériau ne dépend plus de la concentration de sel épandu. Les régions plus sèches, permettant un séchage plus important du matériau, présente des concentrations de chlore similaire, même si la région de Guetsch a une quantité de sel épandu inférieure, au Grand-Saint-Bernard, région utilisant la plus grande quantité de sel épandu. Avec la même analogie, la région de Davos, recevant une quantité de pluie par année la plus faible, ne présente pas un grand écart comparé aux deux autres régions de montagnes qui reçoit au moins 2x plus de sel de déverglaçage (Figure 3).

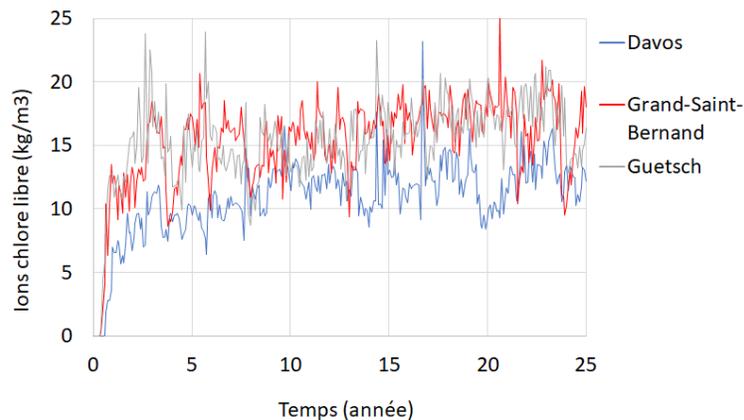


Figure 5 - Évolution temporelle de la concentration des ions de chlore dans le béton exposé aux éclaboussures en zone de montagnes à une profondeur d'enrobage de 30 mm [6].

b. RÉGIONS DE PLAINE

Les régions en plaine (Lugano, Pully et Sion) présentent une quantité de sel épandu similaire (*Figure 3*). Par contre, les quantités de précipitation varient entre 627 (Sion) et 1653mm (Lugano) et l'humidité relative varie entre 69.3 (Lugano) et 71.8% (Pully).

Le temps de contact du sel sur la surface de la structure est conditionné par l'intervalle de temps sans pluie. Lorsqu'il y a précipitation, il y a une dissolution rapide du chlore dans l'eau sur la chaussée, ainsi une diminution rapide du chlore contenu dans le brouillard salin. La *Figure 6*, dans laquelle Lugano est la région avec une humidité relative la plus petite, alors que Pully est la région avec une humidité relative la plus élevée, montre que la région de Sion accueille plus d'ions de chlore que les deux autres régions. Pourtant, dans cette région, la quantité de pluie est la plus petite. Ce temps de contact devient alors important dans la compréhension de la rapidité de migration des ions dans l'exposition au brouillard salin. Les temps de contact relevé dans les trois régions en plaine sont :

- Sion : 3501 heures;
- Pully : 2823 heures;
- Lugano : 1814 heures;

Par conséquent, on s'attend donc à avoir une migration d'ions de chlore plus élevée à Sion (*Figure 6*).

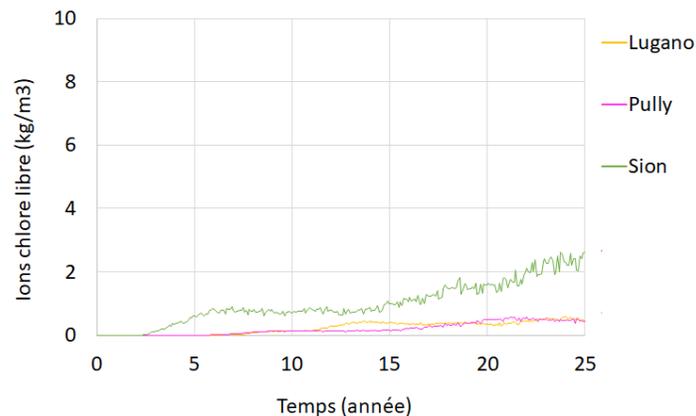


Figure 6 - Évolution temporelle de la concentration des ions chlore dans le béton exposé au brouillard salin en zone de plaine à une profondeur d'enrobage de 30 mm [6].

Les régions en plaine présentent un environnement plus sec avec moins de précipitation lorsque comparé aux régions en montagnes (*Figure 3*). L'effet de la succion capillaire est plus important dans les régions qui présentent des temps de séchage plus importants. Ainsi, à nouveau, la région de Sion présente une migration de chlore légèrement plus accentuée dans les zones d'exposition aux éclaboussures (*Figure 7*).

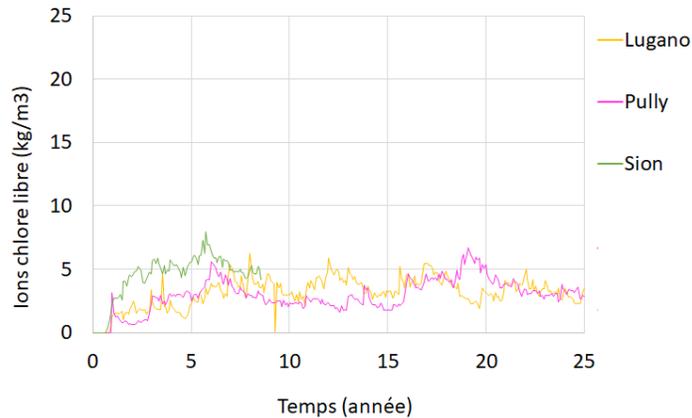


Figure 7 - Évolution temporelle de la concentration des ions chlore au béton exposé aux intempéries en zone de plaines à une profondeur d'enrobage de 30 mm [6].

Une autre étude à Montréal présente également l'évolution de la concentration de chlore au niveau des acier d'armature (*Figure 8*) dans une zone d'exposition directe. Les profils de chlore sont comparés à des carottes extraites d'une structure en fonction du taux d'épandage, simulé avec TranChlor® [8].

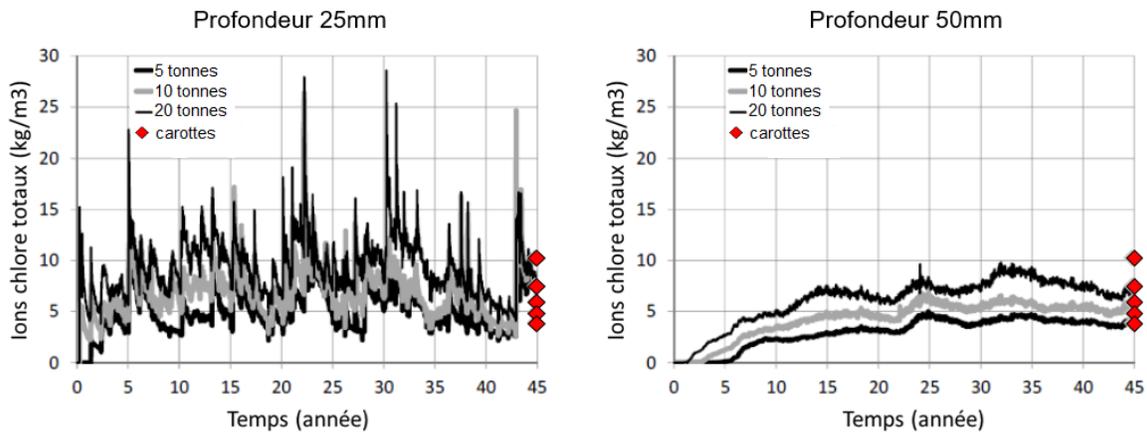


Figure 8 - Évolution de la concentration de chlore à Montréal en différentes profondeur [8].

3. STATION DE MONITORAGE MOBILE (MEXSTUL)

Les conditions en surface des structures en béton ou de bord des modèles (autrement dit l'exposition en période hivernale - présence de sel, d'humidité, d'eau, de gaz carbonique, etc.) sont encore mal connues. Le vent, le trafic et les autres paramètres environnementaux, comme la température, la pluie, l'humidité relative ou encore l'ensoleillement influencent la cinétique de détérioration des ouvrages.

Dans l'optique de mieux connaître l'influence de ces différentes conditions de bord, une station de monitoring mobile (MExStUL) est en construction dans le but d'acquérir des données en bordure de chaussée sous conditions climatiques hivernales réelles

(intempéries, éclaboussures, sel de déglacage, etc.). MExStUL sera placé en bordure de chaussées durant les prochaines périodes hivernales, ce qui permettra d'observer les paramètres environnementaux ainsi que l'évolution temporelle et spatiale des ions de chlore. Les zones d'exposition suivantes sont étudiées : i) brouillard salin ; ii) éclaboussures ; iii) eau stagnante. Elle mesurera l'épaisseur du film d'eau et la concentration de chlore générée par le passage des véhicules de déneigement et des voitures en fonction des conditions climatiques et du niveau de trafic. Les données recueillies alimenteront des modèles de détérioration actuels afin d'améliorer la prédiction de la dégradation des structures en condition hivernale.

Cette station recueillera les données suivantes :

- vitesse, quantité et type de véhicules;
- humidité relative, température ambiante et type de précipitation;
- vitesse et direction du vent;
- ensoleillement;
- concentration et quantité d'éclaboussures mesurées à différentes hauteurs;
- concentration, type de sel et hauteur relative du film d'eau sur la chaussées ainsi que la température des chaussées et du sous-sol;

L'acquisition des données sera faite par télémétrie et sa demande énergétique sera fournie par une alimentation avec des panneaux solaires, ce qui permet de placer MExStUL dans des conditions d'exposition et des lieux différents sans réseau électrique. Pour garantir la sécurité des usagers de la route, MExStUL sera placé à l'intérieur des barrières de sécurité (*Figure 9*).

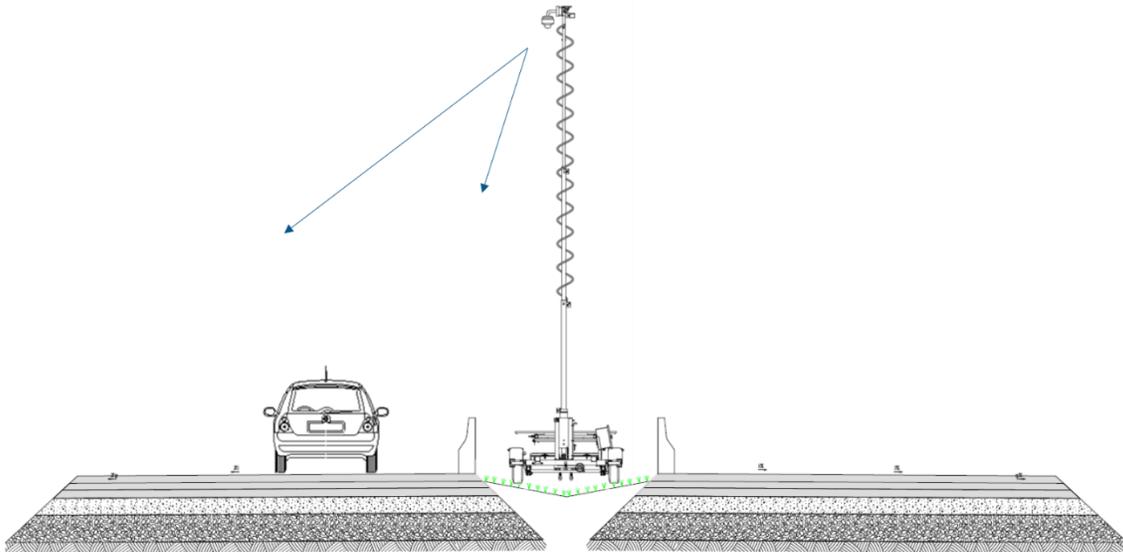


Figure 9 - Schéma de déploiement de MExStUL durant les périodes hivernales.

Connaître les conditions de bord pour ces trois principaux types d'exposition permettra de réaliser une évaluation spatiale des zones les plus critiques au niveau de l'agressivité, ainsi que d'optimiser les périodes d'intervention nécessaires aux maintenances, selon les conditions climatiques et environnementales.

4. CONCLUSION

La durabilité des ouvrages est liée directement aux conditions d'exposition influencées par le climat et l'environnement extérieur. Cette exposition peut alors accélérer ou retarder la vitesse de dégradation des structures.

La dégradation des structures soumises à une exposition au brouillard salin est plus rapide dans les zones plus humides. Cet effet est lié à la saturation des pores du matériau, ce qui favorise la diffusion des espèces ionique. Au contraire, la dégradation des ouvrages causée par le brouillard salin en zone plus sèche est plus lente. Enfin, la quantité de pluie a un effet indirect dans le processus de détérioration de la structure exposé au brouillard salin, car elle modifie le temps de contact du chlore sur la surface des structures.

Le séchage du substrat a également un impact sur l'effet de la succion capillaire. Lorsque le matériau poreux sèche fortement dans le béton d'enrobage, cette succion capillaire de l'eau est plus importante, entraînant ainsi plus loin les ions de chlore. Les structures, exposées aux éclaboussures (précipitation, vent, éclaboussures, etc.), présente une vitesse de dégradation plus lente dans les régions plus humides. L'effet de capillarité peut être également diminué lorsque le matériau est constamment saturé.

Ainsi, la connaissance des conditions de bord améliore la qualité des prédictions des endommagements actuels et la prédiction de l'état de service. La prédiction des détériorations permet ainsi d'optimiser la surveillance et les interventions de maintenance et de remplacement des structures cimentaires.

5. REMERCIEMENTS

Les auteurs aimeraient souligner le soutien financier obtenu du Conseil des sciences naturelles et du génie du Canada (CRSNG), de la Fondation canadienne pour l'innovation (Fonds des leaders John R. Evans) et du Fonds de recherche nature et technologies (FRQNT).

6. RÉFÉRENCES

[1] S.O. Nwaubani, A. Katsanos (2014). Effect of alternative De-icers on the corrosion resistance of reinforced concrete bridges and highway structures, in: M. Aliofkhae (Ed.), *Developments in Corrosion Protection*, InTech, ISBN 978-953-51-1223-5, <http://dx.doi.org/10.5772/57551>).

[2] Ministère des Transports, Mobilité durable et Électrification des transports de Québec-MTMDDET (2015). *Bilan de l'état des structures du réseau routier supérieur québécois*. Bibliothèques et Archives nationales du Québec.

[3] Gouvernement du Québec (2018). *Les infrastructures publiques du Québec : Plan québécois des infrastructures 2017-2027*. Bibliothèques et Archives nationales du Québec.

[4] Conciatori, D. Laferrière, F. Brühwiler, E. (2010). Comprehensive modeling of chloride ion and water ingress into concrete considering thermal and carbonation state for real climate. *Cement and Concrete Research* Vol. 40. Pages 109 – 118.

- [5] Marchand J, Samson E. (2009) Predicting the service-life of concrete structures—limitations of simplified models. *Cem Concr Compos.* 31(8): 515-21.
- [6] D. Conciatori (2005). Effect of microclimate on the corrosion initiation of steel reinforcement in reinforced concrete structures No. 3408. Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne. Doctoral thesis.
- [7] C. K. Larsen, E. J. Sellevold, J-M. Østvik, Ø. Vennesland (2006). Electrical resistivity of concrete - Part II: Influence of moisture content and temperature. 2nd International RILEM Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering. RILEM Publications SARL.
- [8] R. Wolofsky, L. Chouinard, D. Conciatori, J. Bastien (2015). Updating of chloride ingress models using core data measurements. *International Journal of Reliability and Safety* Vol. 9: Pages 291-310.