

Influence des conditions d'exposition des stationnements multiétagés sur la pénétration des chlorures dans le béton

Joëlle Perreault-Chabot¹, Marc Jolin¹, Éric Samson²

¹ Centre de recherche sur les infrastructures en béton (CRIB), Département de génie civil, Université Laval, Québec (Qc), G1V 0A6

² SIMCO Technologies Inc., 1400, boul. du Parc Technologique, Québec (Qc), G1P 4R7

Résumé

La corrosion des armatures provoquée par la pénétration des chlorures est une des causes principales de la dégradation des structures de béton armé en Amérique du Nord. La prédiction de la pénétration de ces ions dans le béton par un modèle numérique est essentielle afin de mieux planifier et quantifier correctement les interventions à réaliser sur une structure dégradée. Plusieurs facteurs, tels la température et l'humidité relative, ont une incidence marquée sur le mouvement des ions chlorure à l'intérieur du béton. Les effets de ces facteurs, de même que les conditions réelles d'exposition des structures aux chlorures sont mal compris, voire inconnus. Ce projet de recherche a donc comme objectif d'évaluer l'influence des conditions d'exposition, auxquelles les structures sont soumises, sur la pénétration des ions chlorure. Les effets de la température, de la variation de l'humidité relative de l'air et de l'application de certains types de protection du béton ont été évalués en suivant le profil de pénétration des ions chlorure dans des éprouvettes de béton en laboratoire. De plus, les concentrations en chlorure présentes à la surface et à l'intérieur du béton, ont été mesurées sur diverses structures de stationnements multiétagés.

1. Introduction

En Amérique du Nord, la dégradation des infrastructures en béton armé par la corrosion des armatures génère des dépenses très importantes d'entretien et de réfection. Dans le domaine des ouvrages d'art, la corrosion est généralement induite par la pénétration des ions chlorure. Ces derniers proviennent des sels fondants épandus sur le réseau routier lors des opérations de déneigement en hiver. Une fois présent en quantité suffisante autour de l'acier d'armature, les chlorures détruisent la couche protectrice naturelle formée à la surface des barres en contact avec le béton (Broomfield, 1997). C'est à ce moment que la corrosion s'amorce. Les produits de corrosion formés lors de cette réaction électrochimique occupent un volume plus important que les phases d'origine, ce qui cause des tensions mécaniques dans le matériau et éventuellement son éclatement (Broomfield, 1997).

Dans ce contexte, la prédiction de la pénétration des chlorures dans le béton par un modèle numérique permet de planifier et de quantifier correctement les interventions sur une structure exposée à cet environnement agressif. Or, la modélisation de ce phénomène est complexe : elle fait intervenir la modélisation du transport des ions dans le béton, mais doit aussi prendre en compte l'effet de la température et de la teneur en eau dans le matériau. Ces deux variables ont une forte incidence sur le déplacement des ions et leur introduction dans les modèles prédictifs est donc importante.

La littérature scientifique propose très peu d'information sur les conditions climatiques et les concentrations en chlorure auxquelles les ouvrages sont exposés dans les pays nordiques. En plus, aucune relation n'a encore été faite entre ces données et la concentration en chlorure présente dans le béton. L'influence de la variation de la teneur en eau dans le matériau sur la pénétration des ions chlorure est aussi peu documentée.

Ce projet de recherche a donc comme objectif d'évaluer l'influence des conditions environnementales auxquelles les structures sont soumises, sur la pénétration des ions chlorure. Les effets de la température, de la variation de l'humidité relative de l'air et de l'application de certains types de protection du béton sont aussi évalués en suivant le profil de pénétration des ions chlorure dans des éprouvettes de béton en laboratoire. De plus, les concentrations en chlorure présentes à la surface et à l'intérieur du béton ont été mesurées sur diverses structures de stationnements multiétagés. Les résultats découlant du programme expérimental de ce projet de recherche apporteront des outils pour mieux connaître les propriétés de transport du béton ainsi que certains facteurs qui les influencent. Les paragraphes qui suivent présentent quelques éléments clés du projet.

2. Matériaux

Des mélanges de béton de deux rapports eau sur ciment ont été fabriqués, soit 0,45 et 0,65. Ces deux rapports ont été sélectionnés afin d'obtenir deux mélanges possédant des propriétés de transport différentes. Le Tableau 1 montre la composition des mélanges de béton ainsi que leurs propriétés à l'état frais. Divers essais ont aussi été réalisés sur les deux mélanges afin de déterminer leurs principales caractéristiques, en particulier les propriétés de transport. La porosité, le coefficient de diffusion des ions, la diffusivité de l'eau dans le béton et la composition de la solution interstitielle ont été déterminés respectivement à partir des essais de porosité, de migration, de séchage et d'extraction de la solution interstitielle. Les propriétés de transport des bétons ainsi que la résistance à la compression et la résistance à la pénétration des chlorures (RCPT) sont montrées aux Tableaux 2 et 3.

Tableau 1 : Composition des mélanges de béton et propriétés à l'état frais

	T10-0,45	T10-0,65
Composition du mélange		
E/C	0,45	0,65
Ciment Type 10 de Lafarge (kg/m ³)	380	280
Eau (kg/m ³)	172	182
Sable (kg/m ³)	815	850
Pierre calcaire 5@14mm (kg/m ³)	922	924
Agent entraîneur d'air (mL/m ³)	95	56
Superplastifiant (mL/m ³)	570	0
Propriétés à l'état frais		
Affaissement (mm)	140	183
Teneur en air (%)	5,7	6,0
Température (°C)	21	21

Tableau 2 : Composition de la solution interstitielle (mmol/L)

Mélange	OH ⁻	CL ⁻	Na ⁺	K ⁺	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺
T10-0,45	274,5	29,4	136,8	171,5	2,4	0,2
T10-0,65	159,0	18,9	84,8	95,3	1,6	0,5

Tableau 3 : Propriétés des bétons

Essais		Échéances (jours)	T10-0,45	T10-0,65
Résistance à la compression	(MPa)	7	34	20
		28	42	27
		90	47	32
		180	53	34
Porosité	(%)	28	12,7	14,0
		180	12,8	13,8
Coefficient de diffusion des ions OH ⁻	(10 ⁻¹¹ m ² /s)	28	12,9	27,1
		180	12,6	23,1
RCPT	(Coulombs)	28	4670	7699
		180	2964	4021
Coefficient de diffusivité de l'eau	(10 ⁻¹⁴ m ² /s)	28	2,2	5,3
		180	3,1	7,7

3. Essais

La progression des ions chlorure à l'intérieur du béton peut être évaluée par la mesure du profil de pénétration des chlorures, à différentes échéances, sur des éprouvettes placées dans un environnement salin. Après une cure de 28 jours, des cylindres de béton de 100 x 200 mm ont été sciés en deux et ensuite scellés avec de la paraffine sur toutes leurs faces à l'exception de la surface sciée. De cette façon, la pénétration des ions chlorure est unidirectionnelle. Finalement, les éprouvettes de béton ont été soumises à différentes conditions d'exposition pour une période de temps déterminée.

Dans le cadre du projet de recherche, trois conditions d'exposition ont été étudiées sur deux mélanges de béton différents, soit la température, la variation de l'humidité relative et la présence de protection à la surface du béton. Dans cet article, seul les résultats de l'influence de la température sur la pénétration des chlorures dans le béton d'un e/c de 0,45 seront présentés.

Pour évaluer l'effet de la température sur la pénétration des chlorures, des éprouvettes de béton ont été immergées dans une solution saline de chlorure de sodium (NaCl) à 500 mmol/L à 5°C et 40°C. Des profils de pénétration des chlorures ont été réalisés après 6 et 12 mois d'exposition.

Les profils de pénétration des chlorures sont obtenus après trois étapes, le broyage, l'extraction des chlorures à l'acide et le dosage. La première étape consiste à réduire le béton en poudre, à l'aide d'une mèche, par couches successives précises mesurées à partir de la surface exposée aux chlorures. L'épaisseur des couches varie de 3 mm à 5 mm. L'extraction des ions chlorure à l'acide nitrique est réalisée selon une technique semblable à celle décrite par la norme *ASTM C1152/1152M : Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete*. Par la suite, la concentration en chlorure des solutions d'extraction est déterminée par titrage avec une solution de nitrate d'argent. Une concentration en mmol/L est ainsi obtenue pour chacune des

couches de béton qui ont été broyées. La concentration est finalement convertie en masse d'ions chlorure par masse de béton.

4. Résultats expérimentaux

Les Figures 1 et 2 présentent les profils de pénétration des chlorures (béton $e/c = 0,45$) à 5°C et 40°C à différentes échéances. Les graphiques montrent la concentration en chlorure en pourcentage de la masse de béton en fonction de la profondeur de béton par rapport à la surface exposée. Après 6 mois d'exposition, la profondeur de pénétration des chlorures est de 25 mm à 5°C et de 43 mm à 40°C . Une augmentation de 35°C accroît donc la pénétration des chlorures de plus de 70%. Les résultats à un an ont permis de confirmer cette tendance puisque les ions chlorure se sont déplacés jusqu'à une profondeur de 31 mm et 57 mm à 5°C et 40°C respectivement. On note aussi que la température ne semble pas affecter la teneur en ions chlorure près de la surface exposée. Les variations importantes observées sur les premiers points des deux profils à 12 mois à la Figure 2 peuvent être attribuées à des erreurs expérimentales ou à des hétérogénéités dans le matériau.

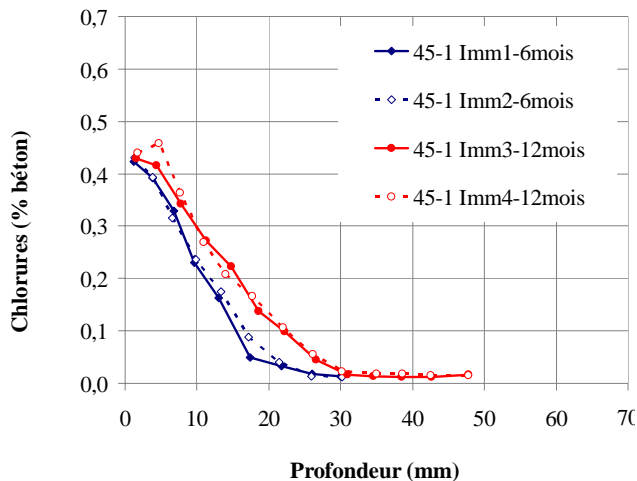


Figure 1 : Profils expérimentaux de pénétration des chlorures des immersions à 5°C ($E/C=0,45$)

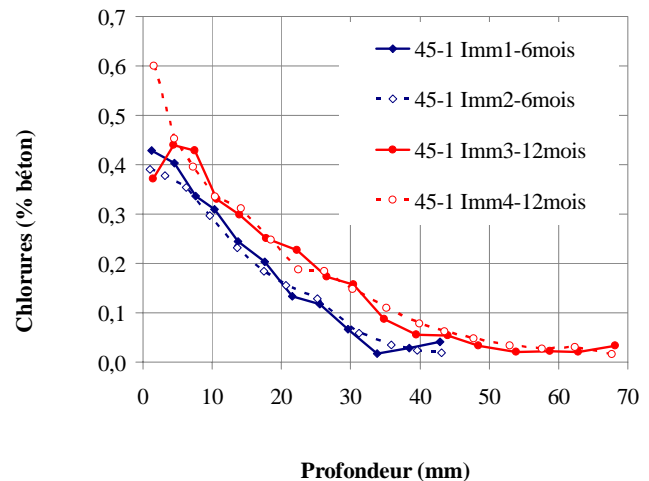


Figure 2 : Profils expérimentaux de pénétration des chlorures des immersions à 40°C ($E/C=0,45$)

5. Résultats des simulations numériques

L'un des objectifs de ce projet de recherche est de valider le modèle numérique STADIUM[®] (Samson et Marchand, 2007) qui prédit la pénétration des chlorures dans le béton. STADIUM[®] est un modèle par éléments finis développé à la suite d'une collaboration entre l'Université Laval et SIMCO Technologies Inc. Les paramètres d'entrée du modèle sont les valeurs des propriétés de transport présentées à la section 2 ainsi que les conditions d'exposition du béton. Les Figures 3 et 4 montrent les résultats des simulations numériques (lignes continues rouge et verte), superposés aux profils expérimentaux (lignes brisées avec points) des immersions du béton 0,45 à 5°C et 40°C . Dans les deux cas, le modèle numérique représente bien les résultats expérimentaux obtenus.

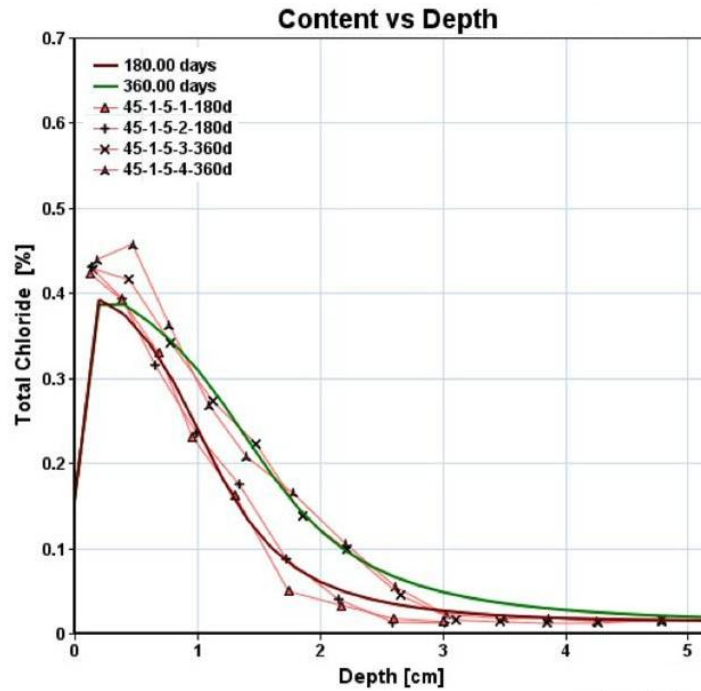


Figure 3 : Simulation des profils de pénétration des chlorures des immersions à 5°C (E/C=0,45)

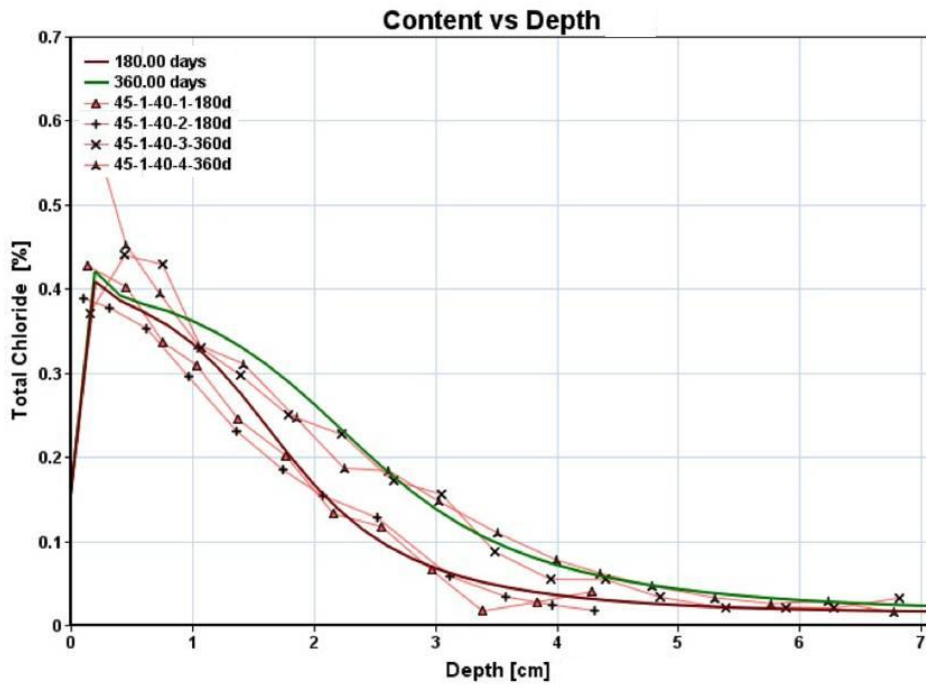


Figure 4 : Simulation des profils de pénétration des chlorures des immersions à 40°C (E/C=0,45)

6. Essais in situ

Les conditions d'exposition aux ions chlorure des stationnements multiétagés étant très peu documentées, un effort particulier a été fait dans le cadre de ce projet afin de recueillir ces données. Ces conditions réelles ont été caractérisées à partir de la concentration en chlorure de solutions (neige, gadoue ou eau) recueillies à la surface du béton dans trois structures de la ville de Québec. Ces données ne correspondent pas au premier point d'un profil de pénétration des ions chlorures généralement nommé C_0 . Elles proviennent de la solution aqueuse chargée en chlorure à la surface de la dalle de béton. La Figure 5 montre la concentration en chlorure mesurée aux trois stationnements sur trois hivers consécutifs (2005 à 2007). Les résultats montrent une grande variabilité dans les concentrations obtenues : elles varient de 0 à plus de 3500 mmol/L. On note par contre que les concentrations en chlorure sont faibles en début de saison, soit pendant les mois de novembre et décembre. Les mois de janvier et février sont ceux où les solutions recueillies sont les plus concentrées et cette concentration diminue jusqu'à la fin du mois de mars.

La détermination de l'exposition aux chlorures des structures n'est pas simple, Un traitement statistique de ces données permettra de déceler les différentes tendances pour en arriver à de meilleures prédictions de la durée de vie des ouvrages.

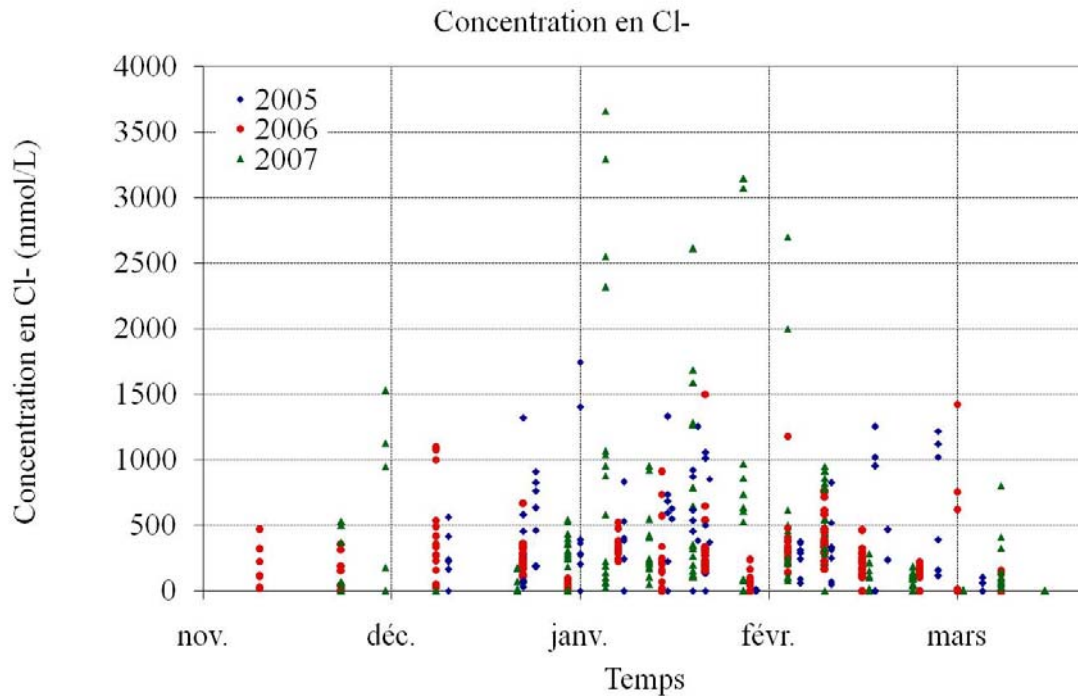


Figure 5 : Concentration en chlorure des solutions recueillies au stationnement du PEPS aux hivers 2005, 2006 et 2007

Afin de connaître l'état actuel d'un stationnement, des carottes de béton ont été prélevées à plusieurs endroits de la structure du PEPS de l'Université Laval à Québec. Ce stationnement a été construit en 1969. Ces emplacements ont été choisis en fonction de leurs différentes conditions d'exposition aux ions chlorure. Des mesures de profils d'ions chlorure ont été réalisées sur ces

éprouvettes (voir Figure 6). Les résultats montrent que la concentration en chlorure varie considérablement en fonction des conditions d'exposition du béton. La comparaison des courbes de couleur bleue démontre que la membrane de protection présente à la surface du béton des espaces de stationnement est efficace pour bloquer la pénétration des chlorures. La courbe verte, à trait plein, présente le profil d'une carotte prélevée dans une aire de stationnement très achalandée. L'apport régulier en chlorure, pendant de nombreuses années par les voitures, se traduit par une concentration plus élevée à cet endroit, et ce sur toute la profondeur prélevée. La courbe rouge montre le profil obtenu à l'endroit où les solutions étaient recueillies à l'entrée du stationnement. Finalement, les courbes vertes, à trait pointillé, présentent les profils de deux carottes de béton adjacentes. Ces carottes proviennent donc du même matériau. La variabilité des résultats entre ces deux profils montre l'influence des conditions d'exposition sur la pénétration des ions chlorure. Les résultats présentés à la Figure 5 pourront permettre de raffiner la prédiction des profils de pénétration des chlorures au stationnement du PEPS.

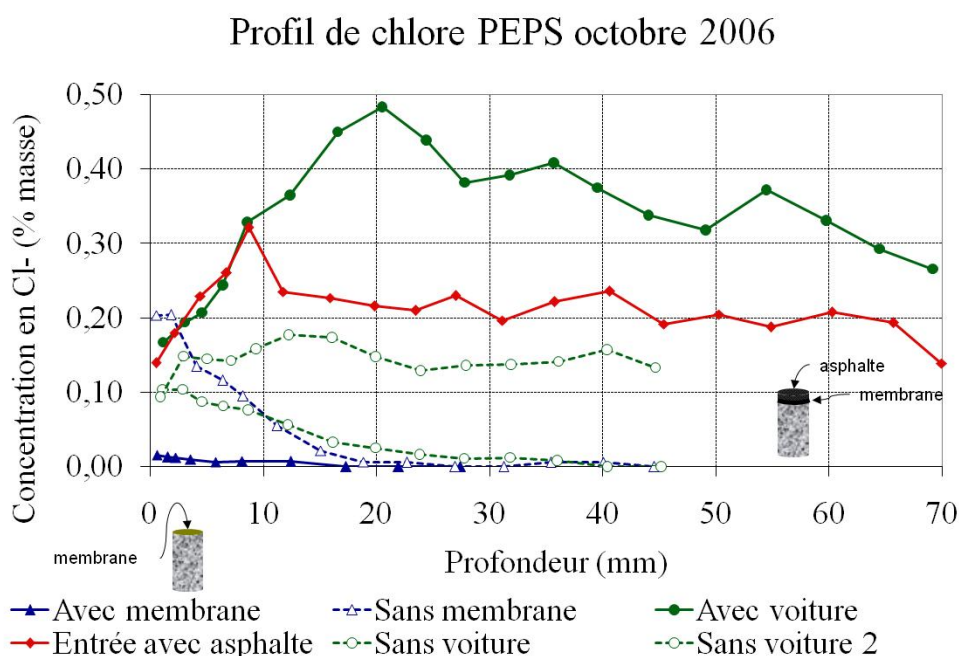


Figure 6 : Profil de pénétration des chlorures sur les carottes de béton du stationnement du PEPS

7. Conclusion

Les différents essais de laboratoire réalisés dans le cadre de ce programme de recherche ont permis d'observer l'influence de certains facteurs externes sur la pénétration des chlorures dans le béton. Ils ont aussi permis de valider le modèle numérique STADIUM[®] au niveau de la prédiction de la pénétration des ions chlorure dans des conditions contrôlées. Les essais in situ ont générés des données qui étaient inconnues jusqu'ici pour les structures de stationnement. Tous ces résultats permettront d'améliorer les connaissances sur les paramètres d'influence des mécanismes de transport des ions chlorure dans le béton. Les suites de ces travaux de recherche mèneront à des prédictions plus justes de la durée de vie des ouvrages par les modèles numériques et à un choix plus approprié des matériaux en fonction des conditions d'exposition.

8. Remerciements

Ce projet de recherche a été réalisé dans le cadre d'une bourse à incidence industrielle offerte par le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG). Il est important de souligner l'implication financière et le soutien technique de l'entreprise parraine, SIMCO Technologies Inc. L'auteure principale tient à remercier le centre de recherche sur les infrastructures en béton (CRIB) pour l'utilisation de ses laboratoires et de son personnel qualifié.

9. Références

Broomfield J.P. *Corrosion of Steel in Concrete*, E&FN Spon, 1997, 272p.

Samson E., Marchand. J. *Modeling the effect of temperature on ionic transport in cementitious materials*. *Cement and Concrete Research*, 2007;37;455-468.