

RÉNOVATION DES BÉTONS. EFFICACITÉ DES IMPRÉGNATIONS HYDROFUGES À HAUT POUVOIR DE PÉNÉTRATION. RÉSULTATS SUR SITE

Préparé par Michel DONADIO
Responsable Technique Marché Rénovation
Sika Services AG

1. INTRODUCTION

Pour les structures de génie civil ainsi que pour les bâtiments, l'eau doit être maintenue à l'écart. En effet, en plus des problèmes d'humidité, l'eau peut être le vecteur pour ramener dans le béton des agents solubles agressifs tels que les chlorures et les sulfates.

Un problème commun à de nombreux pays pour les structures de génie civil est la récurrence de l'Alcali Réaction (AR) qui a besoin d'humidité pour se déclencher.

Les ouvrages massifs de génie civil sont construits pour une très longue durée de service (*le pont Sitra[1]* est prévu pour durer 120 ans).

Cette longue durée de vie ne peut être atteinte que par la combinaison d'une conception appropriée de la structure (qualité du béton, des armatures, etc.) et d'une stratégie de maintenance.

Dans le cadre de cette stratégie de maintenance, les imprégnations hydrophobes à fort pouvoir de pénétration peuvent aider les concepteurs, architectes et ingénieurs, à augmenter cette durée de vie en maintenant éloignés les agents solubles agressifs et en réduisant éventuellement les effets dus à l'Alcali Réaction.



2. ESSAIS EN LABORATOIRE (RÉSUMÉ)

2.1. Une barrière efficace contre les chlorures

T-J. Zhao et al[2] ont étudié l'utilisation d'imprégnation hydrophobe en tant que barrière contre les chlorures. Ils ont montré que pour être efficaces, les imprégnations

hydrophobes devaient être appliquées en quantité suffisante. Appliqués en trop faible quantité, la protection n'est pas totalement efficace.

2.2. Influence des fissures

F. H. Wittmann et al[3] et *J. Dai et al[4]* ont étudié les performances des imprégnations hydrophobes à fort pouvoir de pénétration dans un béton fissuré.

Ces études ont montré que la meilleure protection était apportée quand le traitement avait lieu avant que les fissures n'apparaissent.

Toutefois, en utilisant des hydrofuges de surface qui pénètrent profondément le béton, un certain niveau de protection était malgré tout apporté même si les fissures se développaient après le traitement.

L'étude de *J. Dai et al[4]* montre aussi qu'en utilisant un produit à faible concentration, le béton n'était pas suffisamment protégé dans le temps.

2.3. Alkali Réaction

K. Kosun et al[5] ont étudié en laboratoire l'utilisation d'imprégnation hydrophobe à base de Silane pour réduire

les effets de l'Alcali Réaction. Ils ont pu montrer que l'efficacité de ce traitement était d'autant plus importante que le béton était plus âgé.

3. EXPÉRIMENTATION SUR SITE

3.1. Tunnel en Suède

3.1.1. Procédures

A. Johansson et al[6] ont conduit une étude sur le long terme pour évaluer les effets d'un traitement hydrophobe sur un béton soumis aux sels de déverglaçage dans les zones d'éclaboussures. Un tunnel à fort trafic routier dans la ville de Stockholm a été sélectionné pour cette étude. Chaque année, la route est exposée aux traitements de sel de déverglaçage pendant au moins quatre mois.

Des cubes de béton avec un rapport eau / ciment ($E/C = 0,45$) ont été traités avec un Silane liquide ($> 98\%$ de matière active) conforme aux spécifications du guide du « *Swedish Road Administration* »[7].

Après le traitement, les échantillons de béton (traités et témoin de contrôle) ont été placés à 50 m à l'intérieur du

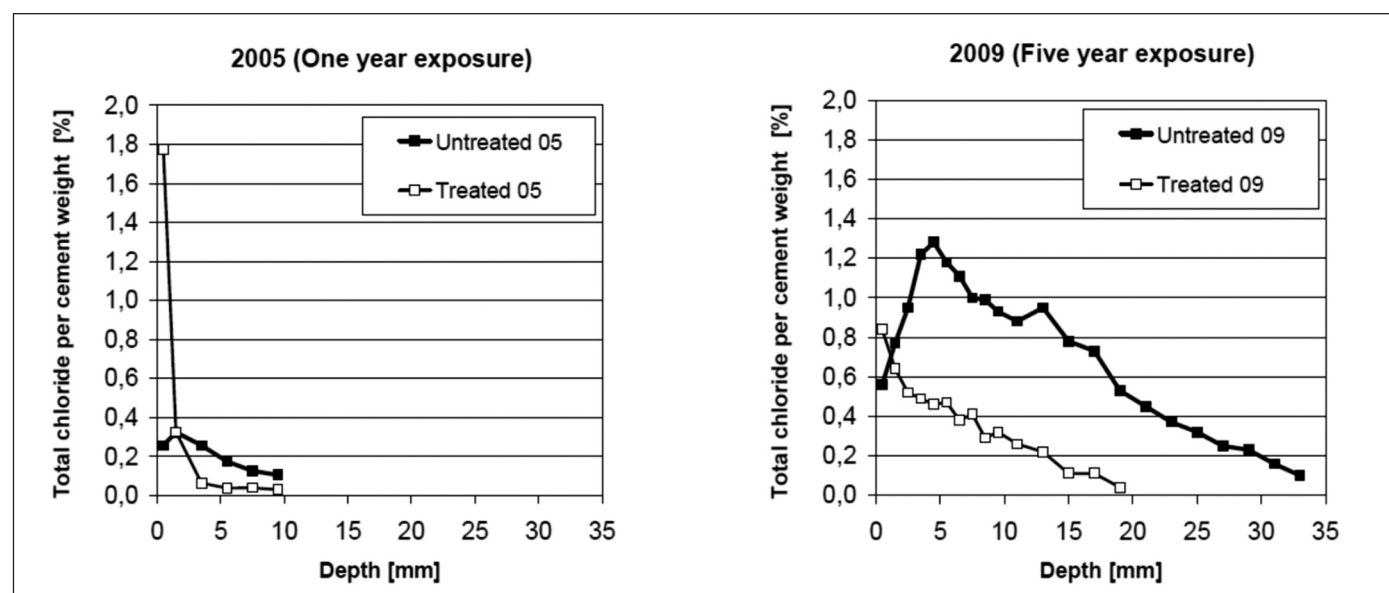
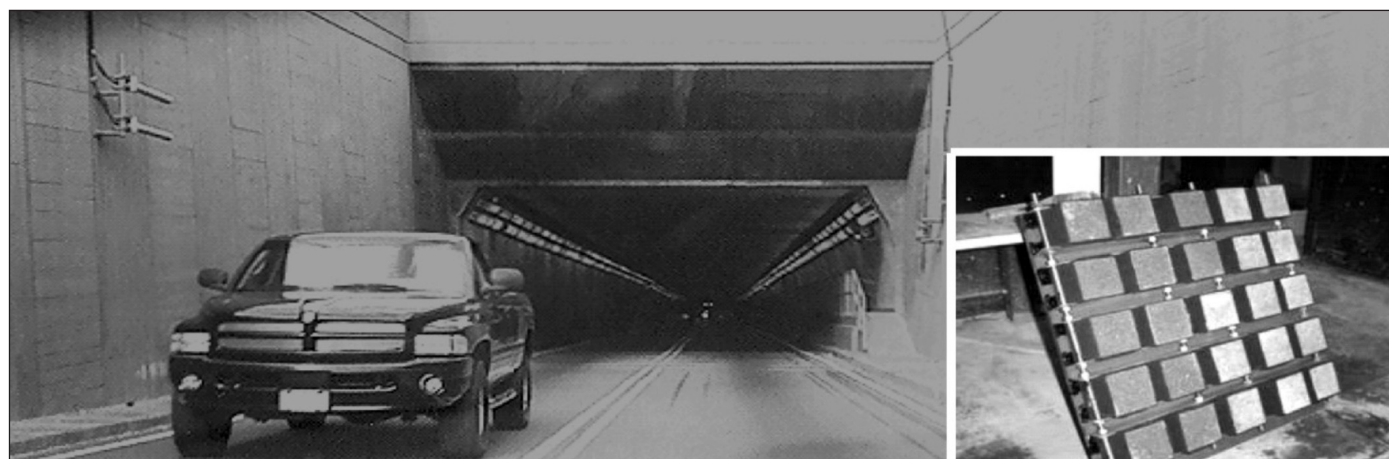


Figure 1 : Profil des chlorures

tunnel dans la zone d'éclaboussures. Chaque année, un échantillon traité et un échantillon non-traité sont prélevés pour être analysés. Les mesures des ions chlorures sont réalisées avec la technique des ions sélectifs.

3.1.2. Discussion/Résultats

En utilisant une imprégnation hydrophobe correspondant aux critères du guide Suédois, A. Johansson [6] a montré que le traitement reste efficace contre la pénétration des chlorures après 5 ans d'exposition dans les conditions climatiques sévères de la Suède. L'étude montre que les chlorures ont commencé à pénétrer profondément dans les échantillons non traités; à l'inverse les surfaces traitées présentent une pénétration de ces chlorures très réduite. Cette étude s'inscrit sur le moyen terme. Les résultats après une plus longue exposition seront communiqués dès que possible.

3.2. Port en Belgique

3.2.1. Procédures

L. Schueremans et al[8] ont conduit une investigation en 1993 sur une structure portuaire traitée avec une imprégnation hydrophobe (produit liquide, > 98% de matière active). La structure est un terminal de containers situé dans le port de Zeebrugge en Belgique. Pour analyser l'efficacité du traitement, trois études consécutives ont été conduites en 1996, 1998 et 2005. Différentes zones du quai en béton ont été traitées : la zone de marnage, la zone d'éclaboussures et la partie horizontale supérieure du quai. Une portion similaire de béton pour chaque zone était laissée non traitée. Pour mesurer les performances du traitement, les essais suivants ont été réalisés :

- Pénétration de l'imprégnation hydrophobe
- Profondeur de carbonatation
- Profil de chlorures dans le béton

3.2.2. Discussion/Résultats

En janvier 2005 (~12 ans d'exposition), la 3^e étude était conduite par L. Schueremans [8]. Il a pu montrer que le traitement avec l'imprégnation hydrophobe restait efficace dans toutes les zones traitées.

La profondeur de pénétration de l'imprégnation variait entre 1 et 6 mm avec une valeur moyenne de 3,5 mm. – les pénétrations les plus faibles étant obtenues dans la partie supérieure du quai. Le front de carbonatation (voir tableau 1) du béton témoin non traité est proche de zéro sur les 3 localisations. Ceci indique que le béton non traité est saturé en eau et de ce fait empêche la migration du gaz dioxyde de carbone. D'un autre côté, les résultats des zones traitées montrent une profondeur de carbonatation plus importante - ce qui est l'indication d'un assèchement du béton. Il est noté que ce front de carbonatation est encore très éloigné des armatures internes en acier.

Localisation	Profondeur de Carbonatation (mm)		
	2005	1998	1996
A : Zone Témoin			
Zones d'éclaboussure	0	0 – 0,05	0
Zones de marnage	0	0	1
Zones B & C : Traité			
Zones d'éclaboussure	8 - 12	6 - 12	4
Zones de marnage	4 - 6	5 - 10	5
Partie horizontale du quai	12 - 16	5 - 10	5

Tableau 1 : Front de carbonatation

Les chlorures solubles et insolubles ont été analysés selon la norme Belge NBN B 15-250. Seuls les chlorures solubles des résultats dans la zone de marnage sont présentés dans cet article (figures 2 & 3). Les autres résultats présentent les mêmes tendances.

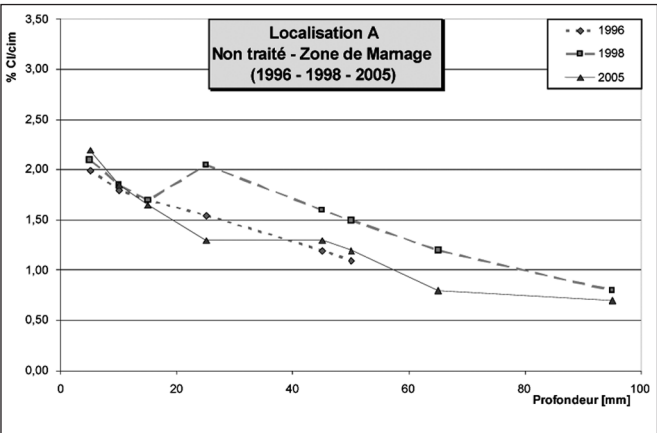


Figure 2 : Zone de marnage – non traitée



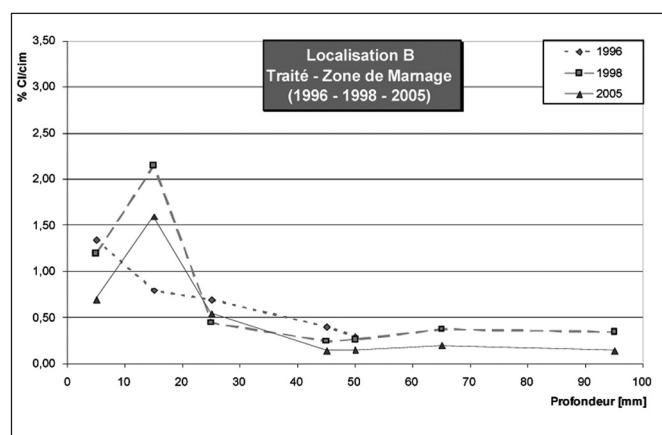


Figure 3 : Zone de marnage - traitée

Après 12 ans, le taux de chlorures dans les zones traitées reste significativement plus faible comparativement aux mêmes zones non traitées. A la profondeur de 50 mm, dans l'échantillon prélevé dans la zone de marnage non traitée, le taux de chlorures excède 1% du poids du ciment – un niveau suffisant pour augmenter les risques de corrosion des aciers; alors qu'à la même profondeur, le taux de chlorures dans la zone traitée reste inférieur à 0,50%.

Note : les variations de taux de chlorures entre les différentes études sont dues aux variations inhérentes à cette analyse (différence dans la qualité du béton, hétérogénéité, épaisseur de l'échantillon, tailles des agrégats au droit du prélèvement, variation de l'analyse, etc.).

Les auteurs ont réalisés une prédiction de durée de vie résiduelle sur la base du coefficient de diffusion des chlorures en faisant varier les niveaux de probabilité. (tableau 2). En utilisant le niveau moyen de probabilité, nous pouvons donc estimer le temps de démarrage du processus de corrosion dans les différentes zones de la structure (voir figure 4).

Coefficient de diffusion D - paramètre de distribution normale et prédiction de la durée de vie après 5 et 12 ans d'exposition					
Localisation	$\mu(D)$ [cm ² /s]x10 ⁻⁸	$\sigma(D)$ [cm ² /s]x10 ⁻⁸	Durée de vie [y] $C_T = 0,7\%$ Cl/ciment		
			$P_{T=0,5}$ $\beta_T=0,0$	$P_{T=0,15}$ $\beta_T=1,0$	$P_{T=0,07}$ $\beta_T=1,5$
A (non traité)	9,58	10,55	16,5	7	5
B (traité)	1,61	2,49	107	35	22
C (traité en surface du quai)	2,13	3,46	91	29	18

Tableau 2 : Coefficient de diffusion des chlorures et prédiction de la durée de vie

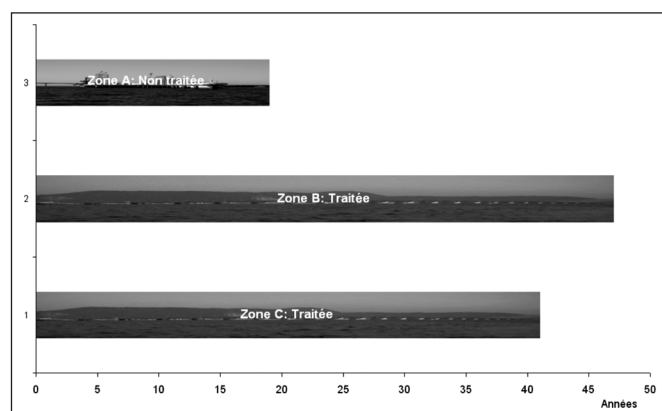


Figure 4 : Estimation du temps pour le démarrage de la corrosion

La figure illustre clairement la différence entre les zones traitées et non traitées.

Avec le béton non protégé, 20 ans après la construction de la structure, nous pouvons estimer que le processus de corrosion a commencé alors que dans les zones traitées il est très réduit ; l'initiation de la corrosion devant avoir lieu dans les 40-50 ans à venir.

3.3. Ponts en Suède

3.3.1. Procédures



Les imprégnations hydrophobes telles que celles à base de Silane sont utilisées en Suède depuis plus de 20 ans et la plupart du temps, le traitement fonctionne correctement. Toutefois, le niveau de performance de ce type de traitement sur une plus longue période n'est pas très documenté. A. Johansson[8] présente une étude montrant les absorptions d'eau de structures traitées par des Silane/siloxane ; certaines étant âgées de plus de 15 ans.

Des carottes de béton ont été prélevées sur 27 ponts pour vérifier les effets du temps comparativement à une étude précédente conduite en 2000 par Nyman and Leon[9] sur ces mêmes structures. Puisque le béton de référence non traité n'était pas disponible, les essais d'absorption capillaire ont été réalisés sur les 2 cotés des carottes (voir figure 5) après un régime de séchage approprié.

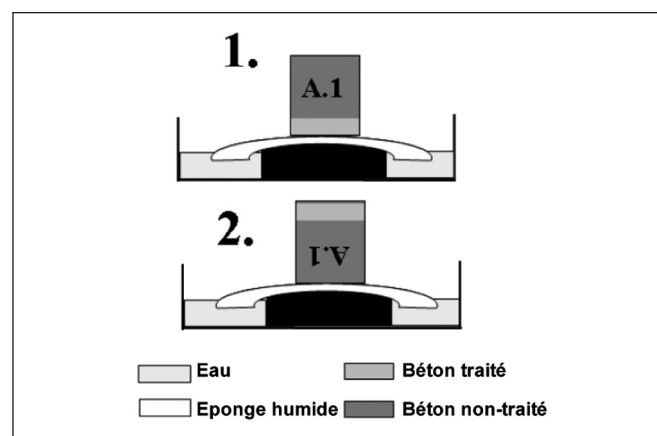


Figure 5 : Description schématique des essais d'absorption capillaire

3.3.2. Discussion/Résultats

Les essais d'absorption capillaire effectués en 2000 et 2005 montrent, dans la plupart des cas, une réduction significative de l'absorption d'eau entre les parties traitées et non traitées.

Les auteurs n'ont pu conclure à l'effet du vieillissement ; par contre ils ont pu montrer que « la durée de vie d'un traitement efficace avec une imprégnation hydrophobe pouvait atteindre au moins 15 ans ».

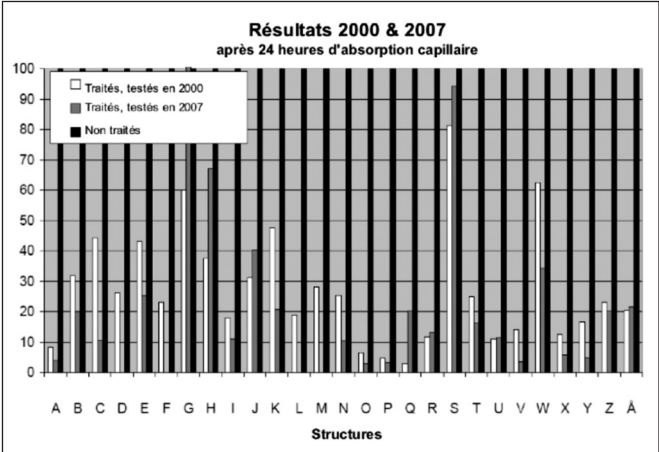


Figure 6 : Absorption capillaire comparativement à la partie non traitée (base 100)

3.4. Mitigation de l’Alcali Réaction en Australie

3.4.1. Procédures

En Australie, F. Salome[10] a étudié la alcali réaction dans des traverses ferroviaires en béton. Ces traverses présentaient des fissures peu de temps après leur fabrication. Des études ont montrées que le processus de dégradation était progressif et qu’il était du à la présence d’agrégats réactifs - à l’origine de l’Alcali Réaction.



Figure 7 : Traverses en béton

Deux sections de lignes (~100 traverses par section) ont été sélectionnées pour des essais d’hydrofugation dans le temps. Une étude systématique et détaillée de chaque traverse a permis de développer une classification numérique des défauts permettant de décrire les états initiaux et leur évolution éventuelle. Une valeur numérique arbitraire a été assignée à chaque type de défauts remarqué. Ces valeurs individuelles ont été additionnées pour chaque zone (traitee et non-traitee). Une traverse sur deux était traitée avec un Silane monomérique pur et l’application réalisée sans préparation de surface préalable, a été faite sur les parties exposées des traverses (la partie donnant sur le sol n’étant pas traitée). Les consommations étaient d’environ 0,8 à 1,0 litre par traverse (0,4 à 0,5 l/m²). L’investigation a été conduite sur 3 ans.

3.4.2. Discussion/Résultats

Initialement les valeurs numériques moyennes pour les 2 séries (traitees et non traitees) de chaque zone étaient proches l’une de l’autre (Sur la ligne Northam 119, la valeur moyenne initiale pour les traverses non traitees est de 10,20 et de 9,20 pour celles traitees). Dans le temps, l’étude conduite par l’auteur montre que les traverses non traitees se détériorent à une vitesse plus rapide que celles ayant été traitees.

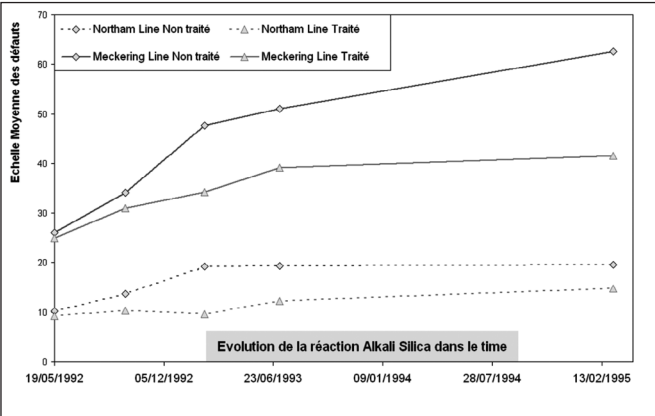


Figure 8 : Effet d’un traitement avec un Silane sur des traverses de béton sujettes à l’Alcali Réaction

Pour les 2 lignes étudiées, la vitesse de détérioration des traverses traitees par imprégnation hydrophobe a été divisée par 6. Dans sa conclusion, l’auteur note que la rapidité de détérioration due à l’Alcali Réaction peut être réduite d’une manière significative en réduisant la pénétration de l’eau dans le béton en utilisant des imprégnations hydrophobes de type Silane.

4. NORMES

En Europe, la norme EN 1504-2 précise les spécifications de performance des imprégnations hydrophobes utilisées pour la protection des bétons de génie civil et de bâtiment. Ces imprégnations hydrophobes correspondent à une des méthodes recommandées pour les principes 1 (protection contre toute pénétration), principe 2 (contrôle de l’humidité) et principe 8 (augmentation de la résistivité) – se référer à la norme EN 1504-9.

Performance	Critère
Absorption d’eau initiale	<7,5% en ratio du témoin non traité
Absorption d’eau après immersion en alkalis	<10% en ratio du témoin non traité
Vitesse de séchage	Classe I: >30% Classe II: >10%
Profondeur de pénétration (E/C = 0,70)	Class I: <10mm Class II: =10mm
gel/dégel avec sel de déverglaçage (E/C = 0,70)	La perte de matière doit intervenir au moins 20 cycles plus tard que le témoin non traité.

Tableau 3 : EN 1504-2 Spécifications des imprégnations hydrophobes

Pour les 3 principes, le produit doit être conforme à tous les critères pour toutes les utilisations, excepté pour la spécification des cycles de gel dégel avec sels de déverglaçage qui concerne uniquement les zones sujettes à un hiver rigoureux. La sélection du type de produit dépend du type de projet, des conditions climatiques et des ambiances agressives éventuelles (ex. milieu marin).

Sur la base des diverses investigations présentées dans cet article, il est important pour la pérennité du traitement (et de fait pour la durabilité de la structure) de préconiser des imprégnations hydrophobes ayant les caractéristiques appropriées. Par exemple, pour infrastructure de génie civil :

- Classe II pour la profondeur de pénétration (> 10mm)
- Classe I pour le temps de séchage afin de minimiser les effets sur les transferts de vapeur d'eau (permettant au béton de s'assécher)
- et finalement en fonction des conditions climatiques de spécifier la résistance aux cycles gel dégel.

5. CONCLUSIONS

Cet article a exploré quelques études significatives et a présenté des résultats sur l'utilisation des imprégnations hydrophobes appliquées sur des structures en béton. Il peut être résumé comme suit :

- Pour être efficace, l'imprégnation hydrophobe doit pénétrer profondément le béton.
Si le produit reste en surface, il ne pourra pas fournir la protection nécessaire sur le long terme. La durabilité ne sera pas assurée.
- Seuls les produits ayant un taux de matière active important peuvent apporter cette protection sur le long terme.
- Les imprégnations hydrophobes en crème ou gel sont les plus performantes car elles pénètrent plus facilement le béton (sans être sujettes à l'évaporation ou la dispersion par l'effet du vent).



- Le traitement de protection reste efficace même en présence de fissures (la meilleure protection est apportée si le produit est appliqué après apparition des fissures).
- L'efficacité est prouvée sur site après plus de 15 ans d'exposition climatique drastique.
- Le traitement est efficace pour réduire les effets de l'Alcali Réaction.
- Seuls des produits conformes aux diverses spécifications normalisées doivent être utilisés. Le marquage CE de ces produits utilisés pour la protection de surface du béton est obligatoire depuis le 1^{er} janvier 2009.

6. RÉFÉRENCES

- [1] *Mostafa A. Hassanain*. The New Sitra Bridges, Specifying and executing concrete for durability in the Middle East; September 2010, Concrete International
- [2] *T.-j. Zhao, F.H. Wittmann and H.-y. Zhan*. Water repellent surface treatment in order to establish an effective chloride barrier. Hydrophobe IV 2005 Stockholm
- [3] *F.H Wittmann, P. Guo and T. Zhao*. Influence of cracks on the efficiency of surface impregnation of concrete. Hydrophobe V 2008 Brussels
- [4] *J. Dai, Y. Akira, E. Kato and H. Yokota*. Investigation of chloride ingress in cracked concrete treated with water repellent agents. Hydrophobe V 2008 Brussels
- [5] *K. Tosun, B. Felekoglu and B. Baradan*. Effectiveness of Alkyl Alkoxy Silane Treatment in Mitigating Alkali Silica Reaction, ACI Materials Journal 105-M03, January/February 2008
- [6] *A. Johansson, M. Janz, J. Trägårdh and J. Silfwerbrand*. Long-term measurements on chloride ingress in water repellent treated concrete in a road tunnel environment. Concec10, 2010, Mexico
- [7] Test report Ref F507580 B rev dated 2005-05-09 – compliance with the instruction in “BRO 2002” of the Swedish National Road Administration
- [8] *L. Schueremans, D. Van Gemert, M. Friedel and S. Giessler-Blank*. Durability of water repellents in a marine structure. Hydrophobe V 2008 Brussels
- [9] *A. Johansson, M. Janz, J. Silfwerbrand and J. Trägårdh*. Swedish Cement and Concrete Research Institute; Long Term Performance of Water Repellent Treatment – Water Absorption Tests on Field Objects in Stockholm. Restoration of Buildings and Monuments Vol. 14, No. 1, 39–48 (2008)
- [10] *A. León and B. Nyman*. The Effectiveness of Water Repellent Treatments. The Journal Bygg & teknik, No. 7, pp. 34-36. 2001
- [11] *F. Salome*. Field Evaluation of the Mitigation Effect of Silane Treatment on AAR in Concrete Railways Sleepers.