

AMELIORATION DE LA DURABILITE DU BETON EFFET DE PRODUITS HYDROFUGES

Fermin ALOU et Yves F. HOUST

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
Laboratoire de matériaux de construction
1015 Lausanne (Suisse)

MOTS CLES : Béton, adjuvants, hydrofuges, capillarité, chlorures, gel-dégel, durabilité.

RESUME

Les problèmes de durabilité du béton sont de plus en plus d'actualité. En effet, les agressions de l'environnement provoquent des dégâts même sur des ouvrages relativement récents et les coûts de réparation peuvent s'avérer très importants. En particulier les sels utilisés pour le déverglaçage des chaussées attaquent d'une façon virulente le béton en contact avec ces sels, surtout lorsqu'il présente une porosité capillaire élevée. Il devient indispensable de protéger les bétons exposés si des précautions particulières n'ont pas été prises pour améliorer la durabilité. Comme les substances nocives pénètrent généralement dans le béton à l'état dissous, il est normal de tenter de limiter au maximum la pénétration de solutions. On peut envisager soit un traitement superficiel, soit dans la masse. Dans ce cas, le système poreux reste en contact avec l'extérieur, mais les solutions agressives ne peuvent plus pénétrer dans le béton.

On présente brièvement les bases théoriques du transport de solutions par absorption capillaire et les effets d'une hydrofugation sur différents types de béton. On a mis en évidence que les traitements limitent fortement l'absorption d'eau et des solutions salines par capillarité. Les essais accélérés montrent que la résistance au gel en présence de sels de déverglaçage est fortement améliorée. Toutefois, la profondeur de pénétration des hydrofuges étant faible, quelques millimètres, la couche protectrice est très sensible à l'usure et au vieillissement, ce qui en diminue notablement l'efficacité à long terme.

ABSTRACT

Durability problems are more and more of the day. Indeed, aggressivity of the environment causes degradations, even on relatively recent structures and repairing costs can be very high. Especially deicing salts, which are used on roads, are aggressive towards concrete, particularly with concrete of high capillary porosity. Therefore, concrete exposed to such severe conditions must be protected if special precautions have not been taken to improve its durability. As harmful agents are generally dissolved to penetrate the concrete, it is obvious to try to limit as much as possible the penetration of solutions by an adequate treatment. Such a treatment can be a surface of a bulk waterproofing. In this case, the porous system of concrete is not destroyed, but harmful solutions can no more penetrate the concrete.

Theoretical basis of solutions transport by capillary suction and the effects of waterproofing, on different types of concrete, are briefly presented. It is shown that the waterproofing largely reduces water and salt solution absorption by capillarity. It is also shown that resistance to freeze-thaw with deicer salts, evaluated by accelerated tests, is largely improved. Therefore, the penetration depth of the waterproofing treatment being low, a few millimeters, the protective layer is very sensitive to wear and to ageing and thus the efficiency at long service is no more guaranteed.

1. INTRODUCTION

Les problèmes de durabilité du béton sont de plus en plus d'actualité. En effet, les agressions de l'environnement provoquent des dégâts même sur des ouvrages relativement récents et les coûts de réparation peuvent s'avérer très importants. En particulier les sels utilisés pour le déverglaçage des chaussées attaquent d'une façon particulièrement virulente les bétons.

Une première possibilité de lutter contre ces attaques est d'utiliser des bétons bien composés, ce qui demande une étude préliminaire de convenance et des moyens de mise en oeuvre et de contrôle sur le chantier. Ces mesures contribuent à élever le coût et ne peuvent être justifiées que pour des ouvrages importants.

L'utilisation de plus en plus fréquente de béton pompé, dont les teneurs en matières fines et en eau sont élevées, favorisent ces agressions. D'autre part, de par sa porosité élevée, ce type de béton se carbonate rapidement et lorsque la carbonatation atteint le niveau des armatures, celles-ci peuvent se corroder. La présence de sels de déverglaçage accélère encore le phénomène de corrosion. Dès lors, il devient indispensable de protéger ces bétons exposés pour améliorer leur durabilité.

Le béton, même lorsqu'il est de bonne qualité, a une capacité d'absorption capillaire élevée et les substances nocives pénètrent généralement à l'état dissous. Pour tenter de limiter au maximum la pénétration d'eau par un traitement adéquat, on peut envisager un traitement superficiel ou dans la masse. Une hydrophobisation superficielle permet dans certains cas d'augmenter de façon importante la durée de vie des constructions en béton : dans ce cas, les solutions susceptibles de contenir les substances agressives ne peuvent plus pénétrer dans le béton par capillarité.

L'hydrofugation des surfaces de béton n'est pas une nouvelle technique. Dès le début de l'utilisation intensive du béton, on a tenté de traiter les surfaces de béton à l'aide d'huiles, de cires et de graisses.

2. MOUVEMENTS D'EAU DANS UN MATERIAU POREUX

Les matériaux poreux échangent de l'eau, sous forme liquide ou gazeuse, à travers les surfaces en contact avec l'environnement. La quantité d'eau que contient le matériau est fonction de l'humidité relative de l'environnement et de la température. Cette quantité d'eau d'équilibre est définie par une isotherme de sorption telle que celle représentée à la figure 1.

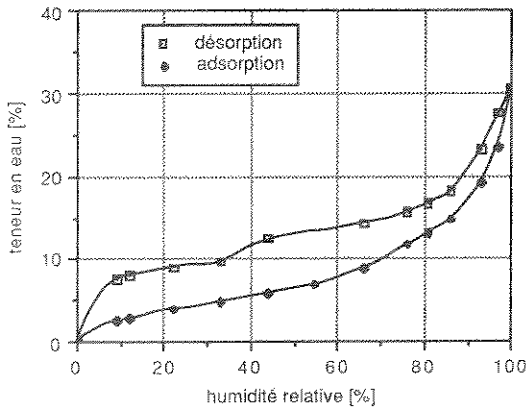


Fig. 1 : Isotherme de sorption de vapeur d'eau à 18°C d'une pâte de ciment durcie, âgée de 2 ans et de rapport E/C = 0,5.

Lorsqu'un matériau sec est mis en contact avec des humidités relatives de plus en plus élevées, la teneur en eau du matériau décrit la courbe d'adsorption. Lorsque le même matériau a été mis en contact avec des humidités relatives élevées et que l'on diminue l'humidité, la teneur en eau d'équilibre du matériau décrit la courbe de désorption; les deux courbes ne se confondent pas et il y a hystérèse, due notamment à la condensation capillaire.

Si l'on met en contact le matériau poreux avec une solution, le liquide pénètre dans le matériau par capillarité. Cela est dû au fait que lorsque l'eau est en contact avec un capillaire, l'interface eau-air se courbe de façon à réduire les tensions de surface entre les trois phases présentes : air, eau, solide. Il apparaît alors une différence de pression entre le liquide et l'air qui est définie par l'équation de Laplace :

$$\Delta p = \frac{2 \sigma \cos \theta}{r} \quad (1)$$

où Δp : différence de pression entre le liquide et l'air [Pa]
 σ : tension superficielle; $\sigma_{\text{eau-air}} = 0.073 \text{ N/m}$
 θ : angle de contact liquide-solide ; $\theta_{\text{eau-béton}} = 0^\circ$
 r : rayon du capillaire [m]

Cette dépression crée l'absorption capillaire. En négligeant l'effet de la gravitation, la vitesse d'absorption d'eau dans les capillaires v peut être décrite par l'équation de Hagen-Poiseuille:

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{\Delta p r^2}{8 \eta x} \quad (2)$$

où : η : viscosité du liquide ; $\eta_{\text{eau}} = 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
 x : hauteur d'absorption [m]

En remplaçant Δp par sa valeur de (1), l'intégration de (2) donne :

$$x(t) = \sqrt{\frac{\sigma \cos \theta r}{2\eta}} \sqrt{t} \quad (3)$$

où t est le temps [s].

Si ΔM est la masse d'eau absorbée par unité de surface [kg/m^2] et ρ la masse spécifique de l'eau, on peut écrire (3) sous la forme suivante :

$$\Delta M(t) = \rho \sqrt{\frac{\sigma \cos \theta r}{2\eta}} \sqrt{t} \quad (4)$$

C'est la formule bien connue de l'absorption capillaire :

$$\Delta M = B \sqrt{t} \quad (5)$$

Si l'on rend hydrophobe le matériau poreux, l'angle de contact θ sera $\geq 90^\circ$, ce qui fait disparaître la dépression capillaire. Un tel matériau ne peut donc plus absorber de solution. Cependant, l'hydrofugation ne modifie pas drastiquement la teneur en eau de matériau transportée à l'état gazeux. Le traitement aura pour effet de fortement diminuer le facteur B de (5).

3. MATERIAUX UTILISES POUR LES ESSAIS

3.1 Bétons

Pour les différents essais envisagés, nous avons utilisé quatre bétons :

- **béton de laboratoire**, avec granulats roulés, dosage en ciment Portland de 300 kg/m^3 , sans adjuvant, rapport E/C = 0,53 et de consistance légèrement plastique;
- **béton traditionnel de chantier**, avec granulats concassés, dosé également à 300

kg/m³, contenant un adjuvant superfluidifiant (SF), de rapport E/C = 0,50 et de même consistance que le précédent;

- **béton traditionnel de chantier avec entraîneur d'air** et granulats concassés. Ce béton était dosé à 325 kg/m³ et contenait deux adjuvants : un superfluidifiant (SF) et un entraîneur d'air (EA). Rapport E/C = 0,52 et consistance plastique;
- **béton destiné à être pompé**, avec granulats concassés contenant un pourcentage de fins (grains < 4 mm) d'environ 50%, dosé à 325 kg/m³, avec un rapport E/C = 0,59 et une consistance très plastique.

Dans le tableau 1, on a indiqué les principales caractéristiques des bétons.

Tableau 1 : Caractéristiques des bétons

Type de béton	Dosage kg/m ³	E/C -	Adjuvants		fc* MPa
			SF -	EA -	
Béton labo	300	0,53	non	non	31,3
Béton traditionnel chantier	300	0,50	oui	non	4,0
Béton traditionnel chantier + air entraîné	325	0,52	oui	oui	31,1
Béton pompé	325	0,59	non	non	26,6

fc* = résistance à la compression à 28 jours sur cylindres 160/320 mm

3.2 Produits d'imprégnation et application

Pour l'imprégnation du béton, nous avons employé deux composés organo-silicium à bas poids moléculaire. Le premier composé a été dissous dans deux solvants, l'éthanol et le "white spirit" et le deuxième dans l'éthanol. La dénomination utilisée par la suite est la suivante :

- Produit A : composé I + éthanol
- Produit B : composé I + white spirit
- Produit C : composé II + éthanol

Ces produits ont été appliqués au moyen d'une pissette et giclés sur des surfaces verticales; sur chaque surface, on a effectué quatre passages en tournant les échantillons de 90°.

La quantité de produit appliqué a été déterminée par des mesures de masse effectuées avant et après le dernier passage. La quantité de produit appliqué en g/m² est reportée dans le tableau 2.

Tableau 2 : Quantité de produit appliqué en g/m²

Type de béton	Produit		
	A	B	C
Béton labo	153	203	131
Béton traditionnel chantier	172	228	153
Béton traditionnel chantier + air entraîné	147	184	188
Béton pompé	153	275	191

Quelques éprouvettes de chaque béton n'ont pas été imprégnées; elles constituent les éprouvettes "témoin" et servent de comparaison.

4. METHODES D'ESSAI

4.1 Pénétration des produits d'imprégnation

La profondeur des produits a été mesurée sur des cubes de béton fendus perpendiculairement à la surface traitée et de l'eau a été pulvérisée sur la surface de rupture. La zone traitée, qui est alors hydrophobe, n'absorbe pratiquement pas l'eau, tandis que les zones où le produit n'a pas pénétré en absorbent et prennent une teinte plus foncée.

4.2 Gel-dégel avec sels de déverglaçage

Nous avons effectué les essais de gel-dégel avec sels de déverglaçage sur des dallettes de 400/400/70 mm, selon la méthode décrite dans [1].

Chaque cycle de gel-dégel comprend :

- gel dans une chambre frigorifique à -12°C durant 14 heures;
- dégel à l'air ambiant du laboratoire (18°C et 50% HR), durant 10 heures.

La perte de masse des dallettes a été déterminée après 10, 20 et 30 cycles de gel-dégel.

Pour chaque béton, nous avons testé des dallettes "témoin", c'est-à-dire non traitées, et des dallettes imprégnées avec les produits A, B et C.

4.3 Coefficient d'absorption d'eau

Pour déterminer le coefficient d'absorption d'eau, nous avons utilisé des éprouvettes cubiques de 150 mm d'arête. Après l'imprégnation, les échantillons ont été conservés à l'air ambiant, soit 18°C et 50% HR, pendant 28 jours. Ensuite, ils ont été placés dans un récipient de telle manière que la surface traitée, correspondant au fond du moule, s'appuie sur des baguettes métalliques en forme de V inversé; de l'eau à 18°C a été versée dans le récipient jusqu'au moment où le niveau d'eau atteignait 10 mm mesurés à partir de la face inférieure du cube. Un schéma du dispositif est représenté à la figure 2.

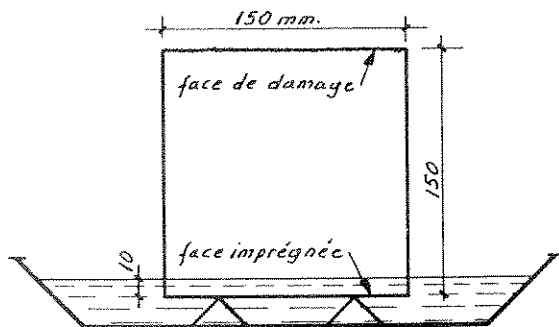


Figure 2 : Schéma du dispositif pour la détermination du coefficient d'absorption d'eau et pour la pénétration des chlorures.

Afin de conserver les éprouvettes dans une atmosphère d'environ 100% HR, les récipients ont été recouverts d'une feuille en polyéthylène.

La masse a été mesurée après 3, 8, 24, 50, 78 et 168 heures .

4.4 Pénétration des chlorures

Les cubes de béton utilisés pour la mesure du coefficient d'absorption d'eau ont également servi pour ces essais. Entre les deux essais, les éprouvettes ont été conservées dans

l'atmosphère du laboratoire pendant trois semaines.

Les cubes ont été placés dans des bacs contenant une solution de chlorure de sodium (NaCl) à 3% et immergés dans 1,5 cm de solution sur la face traitée pendant 2 1/2 mois.

La profondeur de pénétration des chlorures a été déterminée selon la méthode décrite dans [2]. Cette méthode consiste à pulvériser une solution de nitrate d'argent (AgNO₃) 0,1 m sur la surface de rupture des cubes fendus perpendiculairement à la face traitée, puis après séchage, à pulvériser une solution de chromate de potassium (K₂CrO₄). La zone de béton ne contenant pas de chlorures se colore alors en rouge-brun.

5. RESULTATS ET DISCUSSION

5.1 Pénétration des produits d'imprégnation

La profondeur de pénétration des produits d'imprégnation est faible. Elle varie entre un et trois millimètres selon le type de béton et de produit. Comme on le verra plus loin, cette profondeur est suffisante pour résister aux sollicitations étudiées. Cependant, il est possible que cette protection s'altère au cours du temps et qu'à moyen ou long terme, elle ne soit plus suffisante.

5.2 Gel-dégel avec sels de déverglaçage

Les résultats figurent dans le tableau 3 où nous avons indiqué la perte de masse cumulée après 10, 20 et 30 cycles respectivement.

Tableau 3 : Perte de matière sèche cumulée en g/m²

Type de béton	Traitement de la surface avec											
	Néant			Produit A			Produit B			Produit C		
	Nombre de cycles			Nombre de cycles			Nombre de cycles			Nombre de cycles		
	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
Béton labo	1257	1833	3326	319	493	778	674	1264	1813	375	535	598
Béton traditionnel chantier	535	1007	1660	375	653	827	194	451	764	49	70	72
Béton traditionnel chantier + air entraîné	993	2292	4000	83	250	352	431	577	820	14	202	278
Béton pompé	5088	**	-	174	389	486	674	1091	1251	264	785	1195

* une éprouvette sur deux détruite
 ** les deux éprouvettes détruites

Nous avons représenté graphiquement la perte de matière sèche en fonction du nombre de cycles :

- des bétons "témoin" sans imprégnation : figure 3
- du béton traditionnel + adjuvant + air entraîné avec et sans imprégnation : figure 4

De l'examen des figures 3 et 4, on déduit :

a) Bétons non imprégnés :

- le béton pompé est détruit après environ 10 cycles;
- les trois autres bétons considérés présentent une résistance au gel moyenne selon [1];
- d'une manière générale, la résistance au gel varie dans le même sens que le rapport eau/ciment (ou eau + air/ciment lorsque le béton contient de l'air entraîné).

b) Bétons imprégnés

- l'imprégnation améliore fortement la résistance au gel;
- la plupart des bétons imprégnés présentent une résistance au gel élevée selon [1].

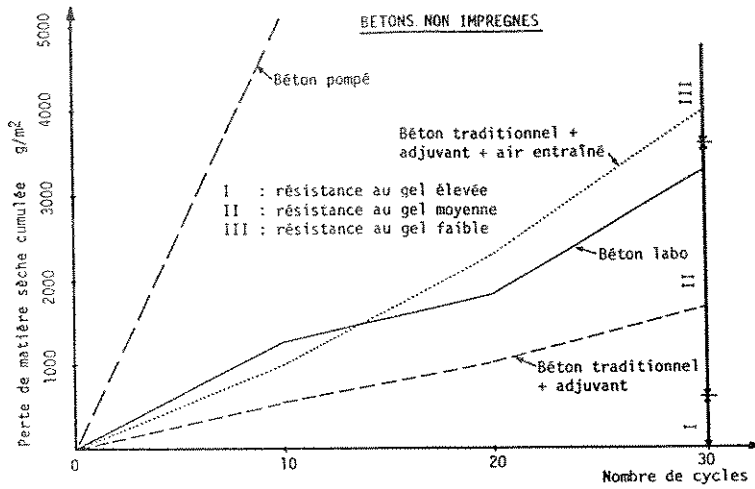


Figure 3 : Perte de matière sèche en fonction du nombre de cycles

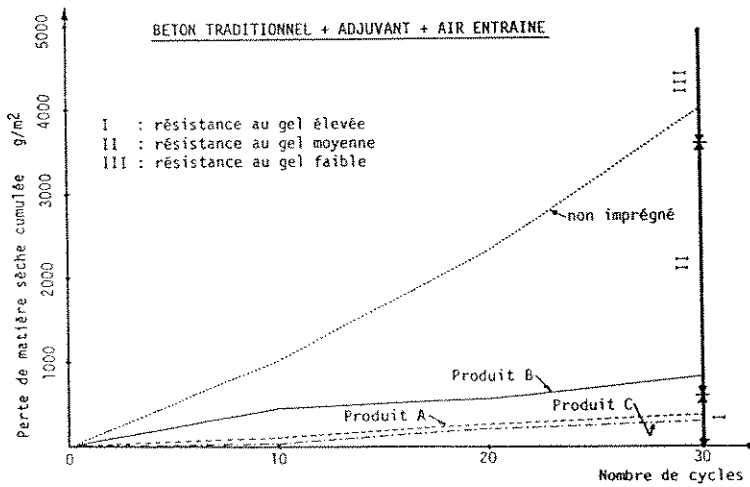


Figure 4 : Perte de matière sèche en fonction du nombre de cycles

Nous sommes d'avis que la Norme SIA 162/1 est trop favorable pour le jugement à long terme de la résistance au gel avec sel de déverglaçage; nous avons donc allongé la durée des essais en poursuivant quatre buts :

- mettre en évidence la différence des dégâts dus au gel et au sel de déverglaçage pour un béton traité avec un hydrofuge de surface par rapport à un béton non traité;
- voir l'influence du temps de contact entre la solution saline et le béton avant le début des cycles de gel (les éprouvettes ont été laissées en contact avec l'eau salée un, deux et trois mois avant le début de l'essai);
- continuer les cycles gel-dégel le plus loin possible au-delà de la limite de 30 cycles;
- utiliser un hydrofuge de masse et comparer avec les résultats précédents.

Les résultats très nombreux, ne peuvent pas facilement être représentés sous forme graphique comme indiqué par Petriccioli [3]. Ils ne sont pas non plus faciles à interpréter, car des essais effectués sur des bétons de laboratoire, conduisant à classer une fois le béton dans la classe "résistance élevée" et une fois entre les deux classes. Ceci met en évidence la variabilité du béton.

L'attaque des bétons hydrofugés ou non se présente de façon différente. En effet, sur les bétons dont la surface n'est pas traitée, l'attaque est uniforme, tandis que dans l'autre cas, elle commence autour des défauts de la structure du béton comme les grands pores et les gros granulats près de la surface, puis elle progresse en surface et en profondeur. On voit alors des zones très endommagées alterner avec des zones sans dégâts.

On a également remarqué que la cure du béton avant le traitement jouait un rôle très important. L'augmentation du temps de contact avec la solution de sel avant les essais de gel tend parfois à amplifier les dégradations, parfois à améliorer la résistance au gel.

Certains bétons, dont notamment le béton pompé, ont une résistance acceptable après 30 cycles, mais par contre leur comportement peut devenir rapidement catastrophique une fois que la surface traitée est détruite.

D'autres essais, qui ne sont pas encore terminés, ont été effectués sur des bétons hydrofugés dans la masse. Les résultats obtenus sont spectaculaires comparés aux bétons hydrofugés en surface. Après 100 cycles, pratiquement tous les bétons hydrofugés dans la masse satisfont aux exigences après 30 cycles pour les bétons résistant au gel et au sel de déverglaçage, tandis que les bétons témoins et hydrofugés en surface sont très endommagés. Toutefois, l'effet des hydrofuges de masse n'est souvent que temporaire; il disparaît après quelques années.

Les possibilités d'hydrofugation du béton, ainsi que les produits utilisés ont été décrits par Vénuat [4].

Les mécanismes de dégradation du béton en contact avec une solution de sel sont très complexes. Ils font certainement intervenir une séquence de processus comme les chocs thermiques, l'expansion due à la formation de glace et la pression de cristallisation des sels. Les personnes intéressées par ce sujet pourront se reporter à un article récent de Pigeon [5].

5.3 Coefficient d'absorption d'eau

Les résultats sont représentés graphiquement sur la figure 5.

Les produits A et B diminuent fortement le coefficient d'absorption d'eau pour tous les bétons considérés et ces deux produits ont un comportement pratiquement identique. Le produit C est équivalent aux produits A et B pour les bétons relativement poreux (le béton pompé et le béton avec air entraîné) tandis que son effet est nettement moins marqué pour les bétons compacts (béton labo et béton chantier avec adjuvant superfluidifiant).

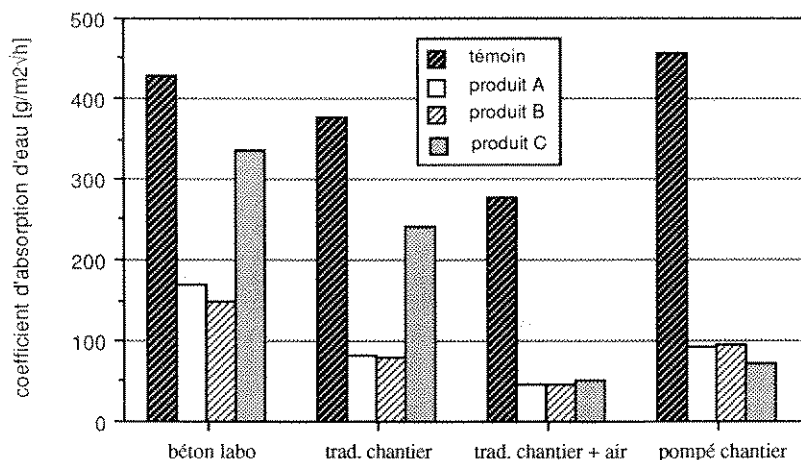


Figure 5 : Coefficient d'absorption d'eau

5.4 Pénétration des chlorures

Les profondeurs de pénétration des chlorures pour les divers bétons et les trois produits sont reportés dans le tableau 5.

Tableau 4 : Profondeur de pénétration des chlorures en mm.

Type de béton	témoin (sans imprégnation)	Eprouvettes		
		Imprégnées avec produit A	Imprégnées avec produit B	Imprégnées avec produit C
Béton labo	5-7	~1	~1	~1
Béton traditionnel chantier	7-15	1-2	~1	~1
Béton traditionnel chantier + air entraîné	8-12	~1	1-2	1-2
Béton pompé	7-25	1-3	1-2	~1

La profondeur de pénétration des chlorures varie entre 5 et 25 mm suivant le type de béton témoin. Sur les échantillons traités la profondeur de pénétration est pratiquement nulle.

Petriccioli [3] a mesuré la pénétration des chlorures à la fin des cycles de gel-dégel. Comme on pouvait s'y attendre, les chlorures avaient pénétré sur toute l'épaisseur du béton fortement endommagé par le gel. La profondeur de pénétration des chlorures après 30 cycles a également été mesurée. Elle varie de 6 à 11 mm suivant le type de béton et suit la même tendance que la perte de matière.

5. CONCLUSIONS

Les différents essais effectués ont mis en évidence les points suivants :

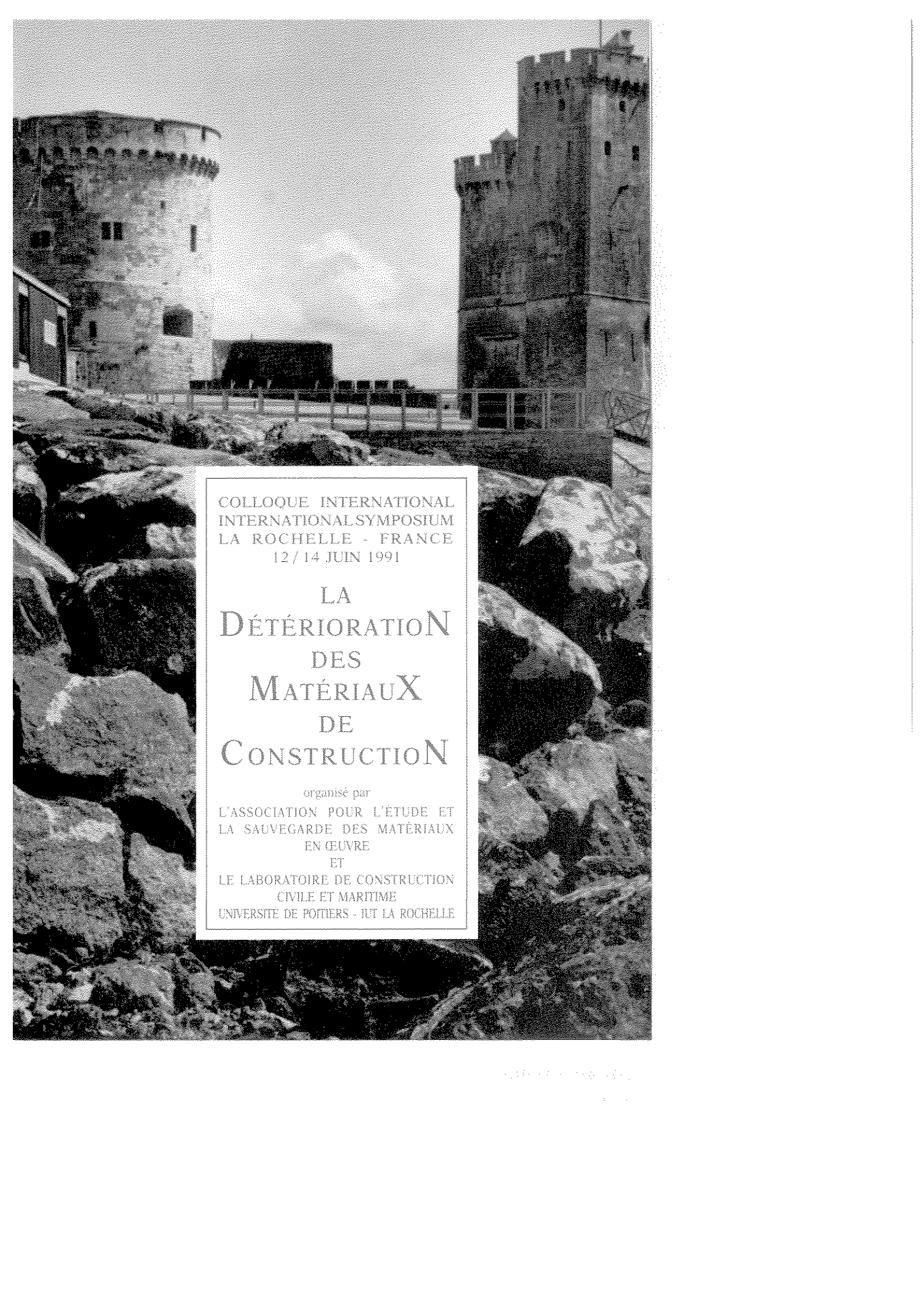
- L'hydrofugation du béton limite fortement l'absorption d'eau par capillarité, ainsi que celle des solutions de sel.
- La résistance au gel et au sel de déverglaçage est élevée selon la norme SIA 162/1 pour

les bétons hydrofugés, alors que les mêmes bétons non traités ont une résistance au gel faible ou moyenne.

- c) En poursuivant les cycles de gel avec sel de déverglaçage au-delà du nombre fixé par la norme SIA 162/1, on remarque que les bétons hydrofugés en surface ont une résistance au gel qui ne dépasse pas celle des mêmes bétons non traités.
- d) L'hydrofugation dans la masse s'avère par contre très efficace pour la durée des essais qui est inférieure à 1 année.
- e) La profondeur de pénétration des produits utilisés pour l'hydrofugation superficielle étant faible, la couche protectrice est très sensible à l'usure. Il faut donc en tenir compte lors d'utilisations pratiques.
- f) L'hydrofugation superficielle du béton augmente certainement la durabilité. Cependant, l'importance des sollicitations et le coût de l'hydrofugation devraient permettre de décider de l'opportunité d'un traitement.

BIBLIOGRAPHIE

1. Norme SIA 162/1, Ouvrages en béton - Essais des matériaux, SIA, Zürich (1989).
2. Widerstandsfähigkeit von Beton gegen chemischen Angriff, Tätigkeitsbericht 1967-1968, Deutsche Zementwerke eV. Forschungsinstitut der Zement Industrie, p. 42.
3. Petriccioli F., Résistance des bétons au gel et aux sels de déverglaçage, Chantiers/Suisse, 19 (1988) 485-491.
4. Vénuat M., Adjuvants et traitements, M. Vénuat (éd.), Châtillon-sous-Bagneux (1984).
5. Pigeon M., La durabilité au gel du béton, Matér. Constr., 22 (1989) 3-14.



COLLOQUE INTERNATIONAL
INTERNATIONAL SYMPOSIUM
LA ROCHELLE - FRANCE
12/14 JUIN 1991

LA
DÉTÉRIORATION
DES
MATÉRIAUX
DE
CONSTRUCTION

organisé par
L'ASSOCIATION POUR L'ÉTUDE ET
LA SAUVEGARDE DES MATÉRIAUX
EN ŒUVRE
ET
LE LABORATOIRE DE CONSTRUCTION
CIVILE ET MARITIME
UNIVERSITÉ DE POITIERS - IUT LA ROCHELLE