

INFLUENCE DES AJOUTS CIMENTAIRES SUR LA PÉNÉTRATION DES CHLORURES DANS LES OUVRAGES EN BÉTON ARMÉ

par

Yannick Maltais et Martin Gendreau

Service d'Expertise en Matériaux (S.E.M.) inc.
1400 boul. du Parc Technologique, suite 103
Québec (Québec), Canada
G1P 4R7

Résumé

La pénétration des chlorures (qui proviennent des sels fondants répandus lors des opérations de déneigement) est une des principales causes de la corrosion des aciers d'armature dans les ouvrages en béton armé. En raison des problèmes importants associés à ce mécanisme de dégradation, beaucoup d'efforts ont été déployés depuis quelques années afin de proposer des moyens permettant de limiter la pénétration des chlorures dans les bétons. Parmi ces moyens, l'utilisation de ciments contenant des ajouts cimentaires semble être aujourd'hui une approche prometteuse. Toutefois, il existe à l'heure actuelle peu de données fiables sur l'influence réelle des ajouts cimentaires sur la capacité des bétons à résister à la pénétration des chlorures. Dans ce contexte, une étude de laboratoire a été entreprise afin d'établir si l'utilisation d'ajouts cimentaires est un moyen efficace pour réduire la pénétration des chlorures et lutter contre la corrosion des aciers d'armature. Cette communication présente plusieurs résultats expérimentaux où la pénétration des chlorures a été mesurée sur une période de 3 à 8 mois dans différents mélanges de béton ($0,35 < e/c < 0,65$) fabriqués avec trois types de liants cimentaires (CSA Type 10, CSA Type 10E-F et CSA Type 20E-F/SF). Les résultats obtenus montrent que l'utilisation d'ajouts cimentaires dans des mélanges de béton bien hydratés permet généralement de réduire sensiblement la cinétique de pénétration des chlorures.

1. Introduction

En Amérique du Nord, la corrosion des aciers d'armature causée par la pénétration des chlorures est la principale cause de la détérioration rapide des structures en béton armé. Selon une estimation prudente, un investissement de l'ordre de 100 milliards de dollars serait nécessaire afin de réhabiliter l'ensemble des ouvrages qui sont actuellement dégradés [1]. Par ailleurs, on estime qu'environ 20 % du coût total de réhabilitation des ouvrages est directement relié à la dégradation des ponts par la corrosion des aciers d'armature.

Les conséquences de la corrosion des aciers d'armature peuvent être très importantes. D'abord, la formation de produits expansifs entraîne bien souvent des problèmes de fissuration et de délamination du béton. Par la suite, des concentrations de contraintes (causées par une réduction locale ou globale de la section d'armature) peuvent être

induites dans l'acier et diminuer la capacité structurale de la pièce. Enfin, il est possible que la corrosion des aciers d'armature entraîne une diminution de l'adhérence entre le béton et l'armature. Il est clair que l'ensemble de ces effets peut éventuellement réduire significativement la durée de vie des ouvrages en béton armé ainsi que la sécurité pour les usagers.

En raison des importants problèmes qu'elle peut engendrer, beaucoup d'efforts ont été déployés depuis quelques années afin d'empêcher l'initiation et le développement de la corrosion des aciers d'armature. Il existe actuellement quelques moyens afin d'enrayer ou de diminuer les problèmes de corrosion. Parmi ces moyens, on compte l'utilisation d'armatures résistantes à la corrosion, les bétons à haute performance et les adjuvants chimiques (inhibiteurs de corrosion) destinés à retarder l'apparition de la corrosion. Par ailleurs, une approche prometteuse dans la lutte contre la corrosion des aciers d'armature pourrait être l'utilisation de ciments contenant des ajouts minéraux. L'utilisation de ces derniers dans les bétons a généralement pour effet d'affiner la porosité et ainsi augmenter la résistance à la pénétration des chlorures des bétons bien hydratés. Toutefois, il existe à l'heure actuelle peu de données fiables sur l'influence réelle des ajouts cimentaires sur la capacité des bétons à résister à la pénétration des chlorures.

2. Objectif de l'étude

Dans le cadre de cette étude, l'influence du type de liant cimentaire (i.e. avec ou sans ajouts cimentaires) sur la cinétique de pénétration des chlorures a été étudiée pour trois séries de mélanges de béton :

- Série 1 : bétons maigres ($e/c = 0,65$),
- Série 2 : bétons structuraux ($e/c = 0,40$) et
- Série 3 : bétons à haute performance ($e/c = 0,34-0,37$).

Selon les mélanges de béton considérés, la cinétique de pénétration des chlorures a été suivie (dans des conditions de laboratoire) pour des périodes allant de 3 mois à 8 mois.

3. Composition des mélanges de béton

Les trois séries de mélanges de béton fabriqués dans le cadre de cette étude (voir les compositions des mélanges montrées aux Tableaux 1 à 3) ont été produits à partir de trois liants différents. Il s'agit d'un ciment portland normal de type 10, d'un ciment portland aux fumées de silice (type 10E-SF) et d'un ciment composé ternaire de type 20E-F/SF. La composition chimique de chacun des liants est présentée au Tableau 4.

Selon les mélanges de béton fabriqués, différents adjuvants chimiques ont été utilisés. Il s'agit d'un réducteur d'eau (mélanges 1 à 8), d'un agent entraîneur d'air et d'un superplastifiant (mélanges 4 à 8). Par ailleurs, il convient de souligner que le mélange 5 a été fabriqué avec un inhibiteur de corrosion.

Tableau 1 – Composition des bétons de la première série (e/c = 0,65)

	Mélange n° 1 (M065-REF)	Mélange n° 2 (M065-FS)	Mélange n° 3 (M065-TER)
Proportion (kg/m ³)			
Ciment	265	262	266
Eau	172	172	172
Sable	950	935	912
Pierre (5-14 mm)	975	979	991
Essai sur le béton frais			
Affaissement à 70 minutes (mm)	30	40	60
Teneur en air (%)	3,0	3,0	2,4

Tableau 2 – Composition des bétons de la seconde série (e/c = 0,40)

	Mélange n° 4 (M040-REF)	Mélange n° 5 (M040-INH)	Mélange n° 6 (M040-TER)
Proportion (kg/m ³)			
Ciment	422	422	431
Eau	168	168	172
Sable	660	648	622
Pierre (5-14 mm)	1030	1010	1010
Essai sur le béton frais			
Affaissement à 70 minutes (mm)	150	90	170
Teneur en air (%)	7,0	5,3	6,0

Tableau 3– Composition des bétons de la troisième série (e/c = 0,34 et 0,37)

	Mélange n° 7 (M037-REF)	Mélange n° 8 (M034-TER)
Proportion (kg/m ³)		
Ciment	417	452
Eau	155	153
Sable	690	684
Pierre (5-14 mm)	1030	994
Essai sur le béton frais		
Affaissement à 70 minutes (mm)	150	170
Teneur en air (%)	7,0	6,0

Tableau 4 – Composition chimique des liants utilisés dans le cadre de cette étude (résultats d’analyse par fluorescence des rayons X)

Oxyde (%)	Nature du liant		
	Type 10	Type 10E-SF	Type 10E-F/SF
CaO	62,7	58,2	44,3
SiO ₂	19,6	26,7	32,2
Al ₂ O ₃	4,27	4,08	8,79
Fe ₂ O ₃	3,03	3,02	5,59
SO ₃	3,33	2,95	3,07
MgO	1,82	1,86	1,64
K ₂ O	0,69	0,79	1,18
Na ₂ O	0,16	0,20	0,25
TiO ₂	0,21	0,17	0,33
SrO	0,09	0,08	0,08
P ₂ O ₅	0,10	0,11	0,14
Mn ₂ O ₃	0,06	0,06	0,05
ZnO	0,04	0,09	0,07
Cr ₂ O ₃	0,01	0,01	0,02
Total	100,2	100,1	100,3

4. Procédures expérimentales

Lors de la production des mélanges de béton, des cylindres de 100 mm x 200 mm ont été fabriqués. Après une période de cure initiale de 3 mois dans une chambre humide à 23° C, la partie supérieure des cylindres a été sciée (sur une épaisseur de 3 mm à 5 mm) afin d’obtenir une surface parfaitement plane. Par la suite, les éprouvettes ont été scellées avec de la cire sur toutes les faces sauf celle exposée au chlorure de sodium (voir la Photo 1). Enfin, les éprouvettes ont été simplement immergées dans une solution de chlorure de sodium préparée à 3,5% (ou 600 mmol/l) et maintenue à 23° C. Le montage typique utilisé pour immerger les éprouvettes est montré à la Photo 2. Une fois les éprouvettes immergées, celles-ci ont été laissées dans la solution saline jusqu’au moment de la mesure du profil de pénétration des chlorures.



Photo 1 – Éprouvette typique utilisée pour les essais d’immersion

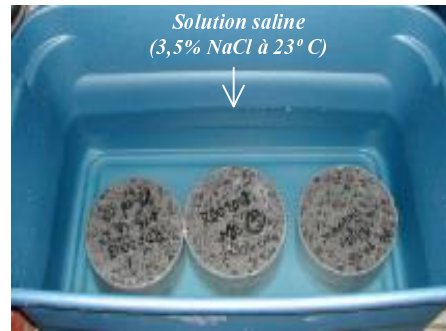


Photo 2 – Montage typique utilisé lors des essais d’immersion (3,5% NaCl – 23° C)

5. Détermination du profil de pénétration des chlorures

Afin de déterminer le profil de pénétration des chlorures, chacune des éprouvettes de béton a été soumise à un meulage (à sec) par fines couches de 2 mm à 3 mm. La poudre récoltée lors des opérations de meulage a été séchée à 105° C pour une période d’environ 24 heures. Par la suite, chacun des échantillons de poudre a été soumis à une extraction à l’acide nitrique (voir la Photo 3). Enfin, la concentration en chlorures des solutions d’extraction a été dosée par titration potentiométrique au nitrate d’argent (voir la Photo 4) Il convient finalement de souligner que les travaux de laboratoire ont été conduits en conformité avec les recommandations de la norme ASTM C1152 (*Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete*).



Photo 3 – Extraction à l’acide



Photo 4 – Dosage des chlorures

6. Présentation des résultats expérimentaux et analyses

Les résultats obtenus dans le cadre de cette étude sont montrés aux Figures 1 à 4. Ces figures présentent la quantité de chlorures (en pourcentage de la masse de béton) en fonction de la position par rapport à la surface des éprouvettes. Les profils de pénétration des chlorures montrés dans cette section permettent de voir clairement l’influence de la

nature du liant cimentaire sur la cinétique de pénétration des ions chlore. Par exemple, les profils de pénétration montrés à la Figure 1 permettent de voir qu'après 3 mois d'immersion dans la solution de NaCl (à 3,5%), la profondeur de pénétration des chlorures est de près de 40 mm pour le mélange préparé avec le liant de référence, de près de 20 mm pour le mélange préparé avec le ciment aux fumées de silice et de seulement 12 mm pour le mélange préparé avec le liant ternaire. Ainsi, pour un mélange de béton préparé avec un rapport eau/liant de 0,65, l'utilisation d'un ciment aux fumées de silice permet de réduire la profondeur de pénétration des chlorures d'environ 50% alors que l'utilisation d'un liant ternaire permet d'obtenir une réduction de près de 70%. Il est également intéressant de souligner que les résultats obtenus après 8 mois d'immersion (voir la Figure 2) ont permis de confirmer les tendances observées initialement.

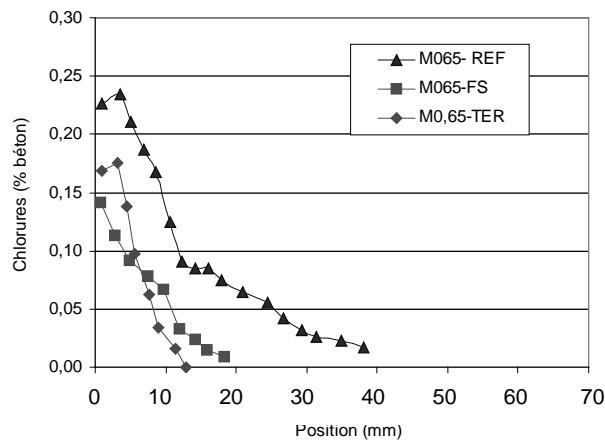


Figure 1 – Profondeur de pénétration des chlorures (bétons maigres) après 3 mois d'immersion dans le NaCl à 3,5% (à 23° C)

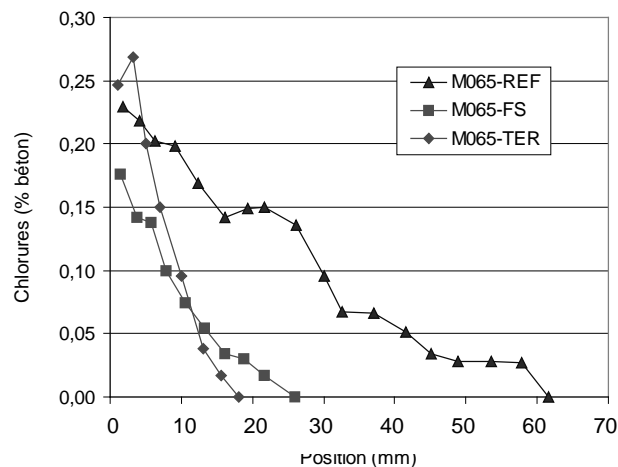


Figure 2 – Profondeur de pénétration des chlorures (bétons maigres) après 8 mois d'immersion dans le NaCl à 3,5% (à 23° C)

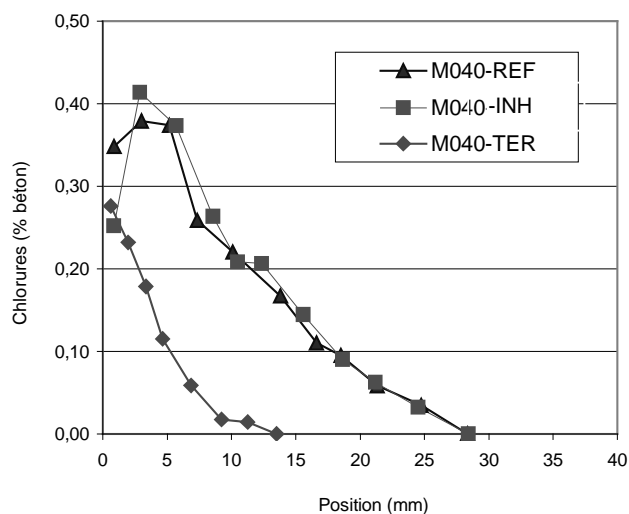


Figure 3 – Profondeur de pénétration des chlorures (bétons structuraux) après 8 mois d’immersion dans le NaCl à 3,5% (à 23° C)

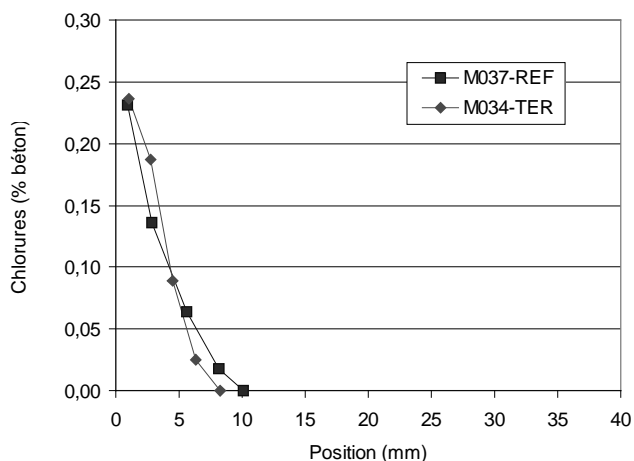


Figure 4 – Profondeur de pénétration des chlorures (bétons à haute performance) après 8 mois d’immersion dans le NaCl à 3,5% (à 23° C)

Les résultats obtenus à partir des bétons structuraux permettent également de voir l’effet marquant du type de liant sur la cinétique de pénétration des ions chlorures (voir la Figure 3). En effet, après près de 8 mois d’immersion dans le NaCl (à 3,5%), la profondeur de pénétration des chlorures dans l’éprouvette fabriquée à partir du liant ternaire est deux fois moindre que dans le mélange de référence (040-TER : 14 mm vs. 040-REF : 28 mm). Par ailleurs, les résultats présentés à la Figure 3 permettent de voir que l’utilisation de l’inhibiteur de corrosion sélectionné dans cette étude ne semble pas avoir d’effet significatif sur la cinétique de transport des ions chlorures. Toutefois, il convient de noter que le rôle de l’inhibiteur de corrosion utilisé dans ce projet n’est pas

de retarder la pénétration des chlorures mais plutôt d'augmenter sensiblement la quantité de chlorures requise (au voisinage de l'armature) afin d'initier la réaction de corrosion.

En ce qui concerne les résultats obtenus à partir des bétons à haute performance, ceux-ci indiquent que le liant ternaire ne joue pas un rôle aussi marquant que pour les deux autres catégories de béton étudiées dans ce mandat. La réduction de la profondeur de pénétration des chlorures est de l'ordre de 20%. Il convient de noter qu'une telle réduction n'est pas suffisante pour tirer une conclusion sur l'influence réelle du liant ternaire sur la cinétique de pénétration des chlorures dans les bétons à haute performance. Toutefois, il est important de souligner que la période d'essai de 8 mois est relativement courte compte tenu de la grande qualité des bétons utilisés.

Enfin, les résultats obtenus dans cette étude confirment l'influence significative du rapport eau/liant sur la cinétique de pénétration des chlorures. À titre d'exemple, une diminution du rapport eau/ciment de 0,65 à 0,40 (pour les mélanges de référence) permet de réduire la profondeur de pénétration des chlorures de 63 mm à 28 mm (i.e. réduction de près de 60%) après 8 mois d'immersion. Pour les mélanges produits avec le liant ternaire, une diminution du rapport eau/ciment de 0,65 à 0,40 permet de réduire la profondeur de pénétration des chlorures de 18 mm à 14 mm (i.e. réduction d'un peu plus de 20%) après 8 mois d'immersion.

7. Conclusion

Les essais de laboratoire réalisés dans cette étude ont montré que l'utilisation du liant ternaire permet de réduire significativement la cinétique de pénétration des chlorures dans les bétons maigres ($e/c = 0,65$) et les bétons structuraux ($e/c = 0,40$). Pour ces deux gammes de béton, l'utilisation du liant ternaire a permis de réduire la profondeur de pénétration des chlorures de près de 50% ($e/c = 0,40$) à 70% ($e/c = 0,65$) après huit mois d'immersion dans une solution de NaCl. En ce qui concerne les résultats obtenus à partir des bétons à haute performance, ceux-ci indiquent que le liant ternaire ne joue pas un rôle aussi marquant que pour les deux autres catégories de béton. La réduction de la profondeur de pénétration des chlorures est de l'ordre de 20%. Il convient toutefois de noter qu'une telle réduction n'est pas suffisante pour tirer une conclusion sur l'influence réelle du liant puisque la période d'essai de huit mois est relativement courte compte tenu de l'excellente qualité des bétons utilisés.

8. Référence

[1] Fasullo, E.J., (1992). *Infrastructure: The Battlefield of Corrosion, Corrosion Forms and Control for Infrastructures*, ASTM STP 1137, pp. 1-16.