

22^e Colloque sur la progression de la recherche québécoise sur les Ouvrages d'art

Effet des conditions de cure sur le béton préfabriqué

Stéphane Thérout, ing., M. Ing., Hanson Tuyaux et préfabriqués Québec

Avril 2015

Résumé

Dans les secteurs du génie municipal, des transports et des ouvrages d'art, les éléments préfabriqués en béton sont très utilisés, car ils contribuent grandement à la résilience de ces infrastructures essentielles.

La fabrication en usine d'éléments en béton utilise des méthodes différentes pour la cure du béton que celui coulé en chantier. Parmi celles-ci, la cure accélérée consiste en un traitement thermique selon un cycle contrôlé dans un environnement humide afin d'optimiser la prise initiale du béton. Tout en conférant au béton les propriétés exigées, la cure accélérée optimise le rendement en usine. La norme CSA A23.4, qui stipule les exigences liées à la préfabrication des éléments en béton, décrit les méthodes de cure acceptables en usine. Une certification est par ailleurs imbriquée dans la norme, liant ainsi le fabricant au respect des exigences techniques.

Dans le but de comparer des résultats d'essais pour trois méthodes de cure différentes, des cylindres témoins ont été soumis à la cure accélérée, à la cure humide pendant 7 jours et à la cure à l'air libre. Par la suite, deux essais ont été réalisés, soient la résistance à la compression du béton et l'essai de perméabilité aux ions chlorures. Le mélange de béton sélectionné, un béton de Type V-P correspondants aux exigences du Tome VII du MTQ, est représentatif des mélanges utilisés en préfabrication. Ce même mélange a été utilisé pour tous les cylindres témoins.

La fabrication des cylindres et leur cure ont été réalisées en usine, sous la supervision de l'ingénieur de l'usine responsable du contrôle de la qualité, comme l'exige la norme CSA A23.4. Un laboratoire indépendant a été engagé pour témoigner de la conformité des procédures et pour réaliser les essais de résistance à la compression et de perméabilité aux ions chlorures.

Les résultats de ces essais seront présentés en lien avec des études semblables réalisées récemment. Une discussion sera faite sur les avantages qu'offre la fabrication en usine d'éléments en béton.

1.0 Introduction

Cet article présente les résultats d'essais effectués pour comparer l'effet de la cure sur les propriétés du béton. La cure du béton consiste à favoriser l'hydratation du ciment Portland par l'eau dans le béton. Les procédures de cure établies consistent en des méthodes de contrôle de température et de l'humidité à l'intérieur et à la surface du béton. Les principales méthodes de cures utilisées sont: la cure humide et la cure accélérée à la vapeur.

La norme CSA A23.4 Béton préfabriqué- Constituants et exécution des travaux, qui stipule les exigences liées à la préfabrication des éléments en béton, décrit les méthodes de cure acceptables en usine.

Des cylindres ont été soumis à trois méthodes de cure différentes : cure accélérée, cure humide pendant 7 jours et à la cure à l'air libre.

Le mélange utilisé est le type V-P, couramment utilisé en préfabrication. Pour un béton de type V-P, la résistance est de 35 MPa à 28 jours avec un rapport eau/liant de 0.45 maximum ainsi qu'une perméabilité aux ions chlorure de 1000 coulombs et moins à 56 jours.

Caractéristiques des bétons de masse volumique normale pour les ouvrages d'art											
Type	Résistance à 28 jours (MPa)	Masse min. liant (kg/m ³)	Type de liant ⁽¹⁾	Rapport eau/liant max. ou dans l'intervalle	Gros granulats (mm)	Teneur en air ⁽²⁾ (%)	Affaissement (mm)		Étalement (mm) ± 50	I max (µm)	Perméabilité aux ions chlorure max. (Coulombs)
							± 30	± 40			
V	35	340	GUb-SF	0,45	5-20	5-8	80 ⁽³⁾	—	—	230	1500
		365	GUb-F/SF, GUb-S/SF								
V-DC	35	340	GUb-SF	0,35	5-20	5-8	— ⁽⁴⁾	—	—	230	1000
V-P	35	390	GUb-SF, HEb-SF ⁽⁵⁾ , HEb-N ⁽⁶⁾	0,45	5-14 5-20	5-8	150	—	—	230	1000
		410	GUb-F/SF, GUb-S/SF								
V-S	35	340	GUb-SF	0,38 à 0,42	5-20	5-8	130	—	—	230	1000
		365	GUb-F/SF, GUb-S/SF								
VIII	50	410	GUb-SF	0,37	5-14	5-8	—	180	—	230	1000
IX	60	410	GUb-SF	0,35	5-14	5-8	—	180	—	230	1000
XI	30	340	GU, GUL	0,50	5-20	4-7	150	—	—	—	—
		330	GUb-F/SF, GUb-S/SF								
XIII	50	410	GUb-SF, GUb-F/SF, GUb-S/SF	0,34 à 0,38	5-14	5-8	170	—	—	230 ⁽¹¹⁾	1000
XIV-C	35 ⁽⁸⁾	400	GUb-SF	0,45	5-14	6-9	—	—	625	230 ⁽¹²⁾	1000
		420	GUb-F/SF, GUb-S/SF								
XIV-R	35 ⁽⁸⁾	460	GUb-F/SF, GUb-S/SF	0,35 à 0,40 ⁽⁷⁾	2,5-10 ⁽⁹⁾	6-9	—	—	675	230 ⁽¹²⁾	1000
XIV-S	35	—	GUb-SF, GUb-F/SF, GUb-S/SF	—	2,5-10	5-9	—	—	650	300	1500
XV	35	450	GUb-SF	0,42	2,5-10 ⁽⁹⁾	6-9	—	200	—	230	1500
XVI-5	35	390	GUb-SF, GUb-F/SF, GUb-S/SF	0,40	2,5-10	4-8	120	—	—	230	1000
XVI-15 ⁽¹³⁾	35	390	GU	0,40	2,5-10 5-14	3-7 ⁽¹⁰⁾	150	—	—	300	1000
XVII	35	400	GUb-SF	0,41	5-14 5-20	6-9	—	—	500	230	1000
		420	GUb-F/SF, GUb-S/SF								

Tableau 1 : Caractéristiques des bétons du Tome VII du MTQ

La norme CSA A23.1-14 Concrete Materials and methods of concrete construction, a les exigences suivantes quant aux classes d'expositions présentées au tableau 2. Il est à noter que la perméabilité aux ions chlorures de 1000 coulombs et moins est maintenant exigée à 91 jours comparativement à 56 jours dans les versions précédentes. Le tableau 3 présente les définitions des classes d'exposition C-XL et C-1

Table 2
Requirements for C, F, N, A, and S classes of exposure

(See Clauses 4.1.1.1.1, 4.1.1.1.3, 4.1.1.3, 4.1.1.4, 4.1.1.5, 4.1.1.6.2, 4.1.1.8.1, 4.1.1.10.1, 4.1.2.1, 4.3.1, 4.3.5.2.2, 4.3.7.2, 4.3.7.3, 7.4.1.1, 8.7.5.1, 8.12.1, 9.4, 9.5, L.1, L.3, and R.3 and Table 1.)

Class of exposure*	Maximum water-to-cementing materials ratio†	Minimum specified compressive strength (MPa) and age (d) at test‡,***	Air content category as per Table 4	Curing type (see Table 19)			Chloride on penetrability requirements and age at test‡
				Normal concrete	HVSCMN-1	HVSCM-2	
C-XL or A-XL	0.40	50 within 56 d	1 or 2§	3	3	3	< 1000 coulombs within 91 d
C-1 or A-1	0.40	35 within 56 d	1 or 2§	2	3	2	< 1500 coulombs within 91 d

Tableau 2 : CSA A23.1 Exigences selon les classes d'exposition

Les classes d'expositions selon CSA A23.1 sont définies dans le Tableau 3 ci-dessous.

Table 1
Definitions of C, F, N, A, and S classes of exposure

(See Clauses 3, 4.1.1.1.1, 4.1.1.5, 4.4.4.1.1.1, 4.4.4.1.1.2, 6.6.7.5.1, and 8.13.3, Tables 2 and 17, and Annex L.)

C-XL	Structurally reinforced concrete exposed to chlorides or other severe environments with or without freezing and thawing conditions, with higher durability performance expectations than the C-1, A-1, or S-1 classes.
C-1	Structurally reinforced concrete exposed to chlorides with or without freezing and thawing conditions. Examples: bridge decks, parking decks and ramps, portions of marine structures located within the tidal and splash zones, concrete exposed to seawater spray, and salt water pools.

Tableau 3 : CSA A23.1 Exigences selon les classes d'exposition

Les types de cures sont mentionnés au tableau 19 de la CSA A23.1 ci-dessous.

Table 19
Allowable curing regimes

(See Clauses 4.1.1.1.1, 7.7.1, 7.7.2.1, 7.7.3.2, 7.8.9, 8.12.2, and Table 2.)

Curing type	Name	Description
1	Basic curing	3 d at ≥ 10 °C or for the time necessary to attain 40% of the specified strength.
2	Additional curing*	7 d total at ≥ 10 °C and for the time necessary to attain 70% of the specified strength.
3	Extended wet curing	A wet-curing period of 7 d at ≥ 10 °C and for the time necessary to attain 70% of the specified strength. The curing types allowed are ponding, continuous sprinkling, absorptive mat, or fabric kept continuously wet.

*When using silica fume concrete, additional curing procedures shall be used. See Clause 1.3.13.

Notes:

- (1) Curing of plant production of precast concrete shall be as set out in CSA A23.4.
- (2) It is recommended that concrete be allowed to air-dry for a period of at least one month after the end of the curing period, before exposure to de-icing chemicals.
- (3) The rate of compressive strength gain in concrete is significantly reduced below 10 °C.

Tableau 4 : CSA A23.1 Type de cure des éléments

Le mélange de type V-P correspond à une classe C-1, mais avec les exigences d'une classe C-XL quand à la perméabilité aux ions chlorures de 1000 Coulombs et moins.

1.1 Méthodologie et procédures de tests

Les échantillons furent réalisés à l'usine de Hanson à Mascouche. Au total, 36 cylindres de 100mm x 200mm furent confectionnés par le laboratoire LVM. Le béton de type V-P avait les caractéristiques suivantes :

- teneur en air : 6.4% ;
- affaissement : 180mm ;
- masse volumique : 2310 kg/m³ ;
- température du béton : 17 degrés.

De ces cylindres, 12 furent soumis à une cure à l'eau, immersion complète dans un bassin, pendant 7 jours. Douze autres cylindres furent soumis à une cure accélérée à la vapeur et 12 furent soumis à une cure à l'air libre.



Photo 1 : Mesure des caractéristiques du béton : Affaissement



Photo 2 : Mesure des caractéristiques du béton : Teneur en air du mélange



Photo 3 : Réalisation des cylindres selon les exigences de la norme CSA A23.2

Deux thermocouples furent mis en place dans les cylindres devant subir une cure accélérée à la vapeur afin de vérifier la température à l'intérieur du béton.



Photo 4 : Mise en place des thermocouples



Photo 5 : Cylindres soumis à la cure accélérée

La norme CSA A23.4 stipule qu'on doit protéger les surfaces de béton contre les pertes d'humidité, par exemple, en recouvrant les surfaces d'une toile ou de feuilles de plastique, en les vaporisant ou en s'assurant qu'une humidité relative de 100 % soit maintenue dans l'enceinte de cure. Dans notre cas, l'humidité relative est maintenue à 100% et les cylindres protégés par des pellicules de plastique.

2.0 Modes de cure

La norme CSA A23.4 à l'article 23.4 exige que les prescriptions du tableau 19 de la CSA A23.1 doivent être rencontrées pour un béton de type C-1 et C-XL. Toutefois, les différences inhérentes à la préfabrication par rapport au béton coulé en place sont reconnues et traitées dans ce même article.

23.4 Cure du béton à haut rendement (béton de type C-1 et C-XL)

Les méthodes de cure prescrites dans la CSA A23.1 doivent être observées. Cependant, on peut employer des méthodes de cure propres à une usine de béton préfabriqué s'il a été démontré que ces méthodes produisent un produit fini qui satisfait ou dépasse toutes les exigences de performance applicables au béton C-1 ou C-XL, selon le cas, prescrites dans la CSA A23.1. Tous les essais doivent avoir été effectués et documentés avant le début des travaux et examinés par le maître d'ouvrage avant le début de la production du béton préfabriqué.

Note : Voir le tableau 1 de la CSA A23.1

Le CCDG 2015 à l'article 15.4.3.5.10 mentionne les exigences du MTQ quant à la cure des éléments préfabriqués.

15.4.3.5.10 Cure des éléments en béton préfabriqués

La cure des éléments en béton préfabriqués, sauf les poutres, doit être réalisée selon les mêmes exigences que pour les éléments en béton coulés en place à l'exception de la période de cure qui doit être d'un minimum de 140 °C-jours ou jusqu'à ce que le béton atteigne la résistance à la compression exigée à 28 jours. La vérification de la température du béton doit être effectuée à l'aide d'au moins un thermocouple inséré dans le béton à un endroit représentatif. Le ou les thermocouples doivent être reliés à un système d'acquisition de

La cure doit être maintenue pour un minimum de 140 degrés-jours ou jusqu'à ce que le béton atteigne la résistance à la compression exigée a 28 jours. Par exemple, pour obtenir 140 degrés-jours, on peut maintenir la température du béton à 20 degrés Celsius pendant 7 jours.

2.1 Cure accélérée

La cure accélérée est un traitement thermique contrôlé qui favorise la prise initiale du béton et ainsi optimise le rendement en usine. Introduite en préfabrication depuis plus de quatre décennies la cure accélérée des éléments préfabriqués leur confère à la fois les propriétés requises tout en optimisant les opérations de fabrication.

Le tableau 2 de la norme CSA A23.4 présente les conditions à respecter quant au cycle de cure accélérée des éléments préfabriqués.

Tableau 2
Cycle de cure accélérée
(voir l'article 23.2.2.3.4)

Cycle de traitement thermique	Catégorie d'humidité	
	Sèche	Humide
Période d'attente minimale (délai) avant l'application de la chaleur et température maximale du béton pendant la période d'attente	1 h à 30 °C	3 h à 30 °C ou 4 h à 40 °C
Vitesse maximale de chauffage, °C/h*	20	20
Température maximale du béton, °C	70	60
Vitesse maximale de refroidissement, °C/h†	15	15

*Pour le béton structural léger et semi-léger, la vitesse de chauffage doit être limitée à 10 °C/h.
†Le refroidissement doit se poursuivre jusqu'à ce que la température du béton dépasse d'au plus 20 °C la température ambiante à l'extérieur de l'enceinte.

Tableau 5 : CSA A23.4 Exigences du cycle de cure accélérée

Il existe deux types de cure accélérée : sèche et humide. Dans la catégorie dite sèche, une enceinte reçoit de la chaleur rayonnante ou un chauffage électrique capable d'assurer une distribution uniforme de la chaleur. Les tuyaux ou les appareils de chauffage électrique ne doivent pas être en contact direct avec le béton, les coffrages ou les éprouvettes.

Dans la catégorie humide, de la vapeur vive est injectée dans une enceinte capable de la retenir. Les jets doivent répartir la vapeur uniformément et ne doivent pas être dirigés directement sur le béton, les coffrages ou les éprouvettes.

Dans notre cas, la cure accélérée fut réalisée selon la catégorie dite humide par l'injection de vapeur à l'intérieur d'une enceinte.

La température est contrôlée à l'intérieur de la chambre et la température à l'intérieur du cylindre ou de la pièce est enregistrée à l'aide de thermocouples.

La figure 1 ci-dessous présente le graphique du cycle de cure des 12 cylindres ayant subi une cure accélérée. La température maximale atteinte dans le cylindre est de 47 degrés Celsius. La température maximale permise est de 60 degrés Celsius selon la norme CSA A23.4.

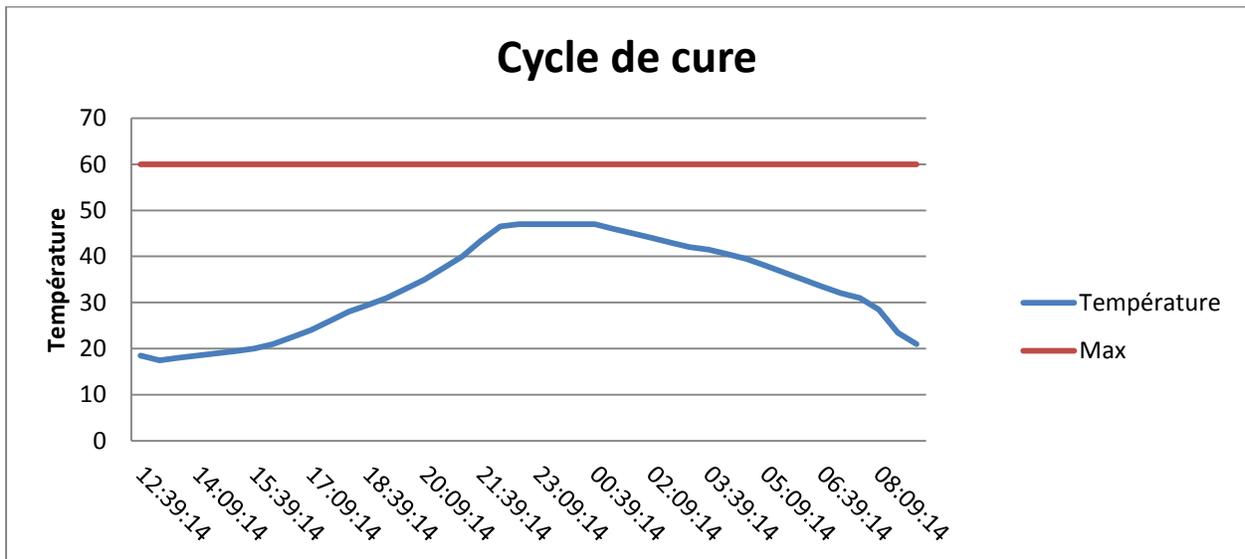


Figure 1 : Cycle de cure des éléments

La figure 2, présente les températures enregistrées à l'intérieur de l'enceinte de cure. On remarque que la température maximale atteinte est de 40 degrés Celsius. La température à l'intérieure de l'enceinte est contrôlée par ordinateur et soumis à un cycle de cure programme qui contrôle l'apport de vapeur à l'intérieur de l'enceinte de cure.

On remarque une période d'attente de 3 heures à plus ou moins 20 degrés, par la suite une montée constante du chauffage pour atteindre la température maximale maintenue pour une

2.3 Cure à l'air libre

La cure à l'air consiste à maintenir à l'air libre et à une température supérieure ou égale à 10 degrés C pour une période de 3 jours ou jusqu'à 40% de f'c.

Dans notre cas, les cylindres furent gardés à l'air libre à une température moyenne de 20 degrés.

3.0 Résultats – Résistance à la compression

Les cylindres furent réalisés selon les recommandations de la norme CSA A23.2 et les cylindres furent brisés au démoulage, puis à 3 jours, 7 jours et 28 jours. Nous sommes en attente des résultats à 56 jours. Les cylindres furent gardés à l'intérieur du laboratoire suite aux cures respectives. La température fut gardée à 20 degrés Celsius pour l'ensemble de la cure. Le tableau 6 montre les résistances obtenues en fonction de la cure effectuée.

	Démoulage	3 Jours	7 Jours	28 Jours
Humide	21.8	35.3	46.3	60.7
Sec	17	32.6	41.1	45.4
Vapeur	31.4	35.5	42	47.7

Tableau 6 : Résistances à la compression selon le type de cure

La figure 3 présente les résistances sous forme de graphique.

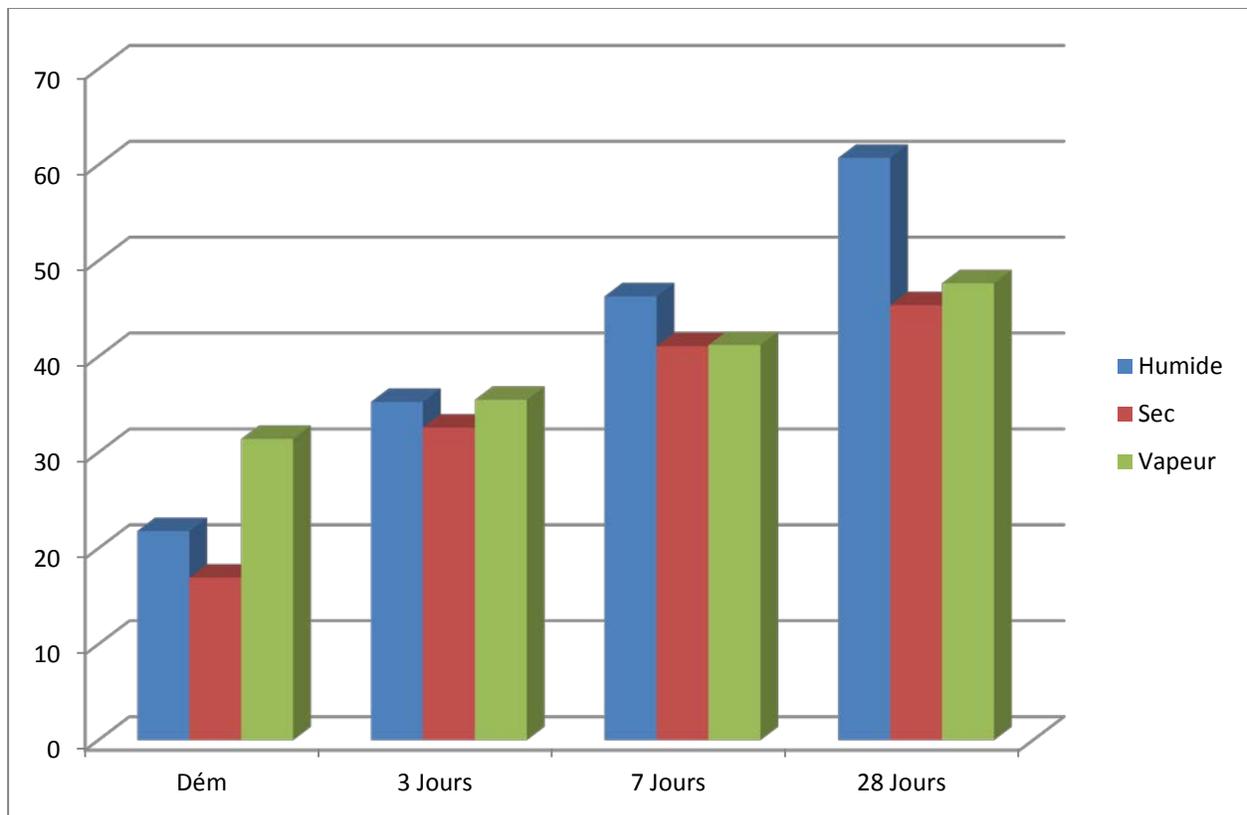


Figure 3 : Résistances à la compression des cylindres selon le type de cure

3.1 Discussion

La cure accélérée confère rapidement au béton, comme son nom l'indique, des résistances à la compression plus élevées que les deux autres méthodes, et ce dès le démoulage. Plusieurs autres éléments sont à souligner :

Après trois jours, les résultats sont comparables, quel que soit le mode de cure. La cure accélérée et la cure humide produisent déjà des résultats conformes.

Après 7 jours, tous les modes de cure, même la cure à l'air libre donne des résultats nettement supérieurs aux 35MPa exigés.

À 28 jours, tous les modes de cure produisent des résultats conformes aux exigences, la cure humide de 7 jours donnant des résultats supérieurs aux deux autres types de cure.

4.0 Résultats – Perméabilité aux ions chlorures

Les essais de perméabilité aux ions chlorures selon ASTM C1202 pour les différents régimes de cure sont en cour de réalisation.

Toutefois, Hanson possède de nombreux résultats antérieurs d'essais de perméabilité aux ions chlorures dans le cadre des divers contrôles de conformité requis, entre autres par le MTQ. Trois mélanges sont régulièrement soumis aux essais de perméabilité aux ions chlorures : type V-DC, type XIV-C et type V-P. Les résultats moyens présentés ci-dessous sont pour des

échantillons ayant subi une cure accélérée comparable à celle subie par les échantillons pour ces différents mélanges. La figure 4 présente sous forme de graphique les perméabilités moyennes obtenues selon les mélanges.

Mélange de Type V-DC : 420 Coulombs

Mélange de Type XIV-C : 600 Coulombs

Mélange de Type-V-P : 824 Coulombs

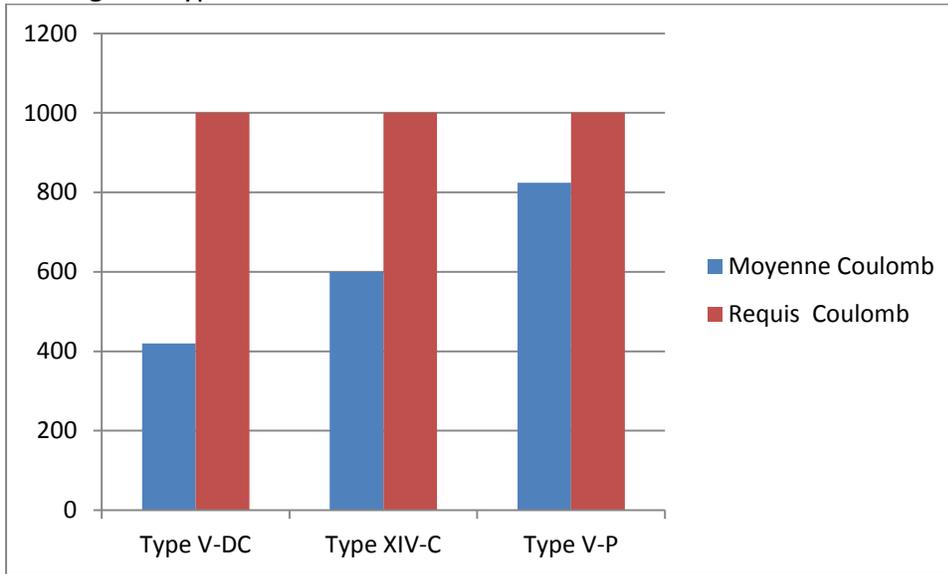


Figure 4: Perméabilité moyenne obtenue selon le type de mélange pour l'essai ASTM C1202

Le fournisseur d'adjuvants utilise un programme pour estimer la perméabilité du mélange selon la recette. La figure 4a présente l'estimé de perméabilité pour la gâchée utilisée pour la réalisation des cylindres. La perméabilité estimée est de 743 Coulombs. Ceci correspond assez bien avec la moyenne des résultats obtenus par le passé de 824 Coulombs.

RCP ESTIMATOR OUTPUT

Customer / Plant:	Hanson - Mascouche	Mix Date:	20 février 2015
Mix ID / Number:	Mélange 41	Units:	Metric
Test Age (days):	56	Comments:	Vérifié perméabilité estimé. Gub-SF contient 8% de fumée de silice (8% de 384 kg= 31 kg)
Concrete Temp.:	17 C		

MIX INGREDIENT	AMOUNT (kg/m3)	SPECIFIC GRAVITY
CEMENT	353	3.15
FLY ASH		
SILICA FUME (RHEOMAC SF 100)	31	2.20
SLAG CEMENT		
FINE AGGREGATE	795	2.69
COARSE AGGREGATE #1	986	2.72
COARSE AGGREGATE #2		
WATER	151	1.00
AIR CONTENT (%)	6.4	w/cm: 0.39

ADMIXTURE TYPE	PRODUCT NAME	DOSAGE
AIR-ENTRAINER:	MICRO AIR	28.0 (mL/100 kg)
ACCELERATOR		
RETARDER:		
WATER REDUCER:	POZZOLITH 210	355.0 (mL/100 kg)
MID-RANGE WR:		
HIGH-RANGE WR:	GLENIUM 7700	255.0 (mL/100 kg)
VISCOSITY MODIFIER:		
ASR INHIBITOR:		
CORROSION INHIBITOR:		
SHRINKAGE REDUCER:		
COLOR:		

Estimated RCP Value:	743 Coulombs
Range:	493 - 993 Coulombs

Figure 4a : Estimateur de perméabilité aux ions chlorures

Un test de résistance à l'écaillage fut effectué en 2014 sur le béton type-V-P ayant subi une cure accélérée. L'essai fut effectué selon la norme LS-412. Les pertes par écaillage furent très faibles de l'ordre de 0,03 kg/m². La perte admissible selon la norme LS-412 est de 0,8 kg/m². La figure 4 présente les résultats de l'essai.

1.0 DÉTAILS

Requérant	:	Hanson
Échantillons	:	Plaques de béton de ciment fabriquées par le client le 16 septembre 2014 Formule 3514V-P-14mm, Mélange 41, Ciment type GUB-SF de Holcim, Pierre et sable de Bauval, Micro air, Glenium 7700 et Pozzolith 210 de BASF
Cure	:	Effectuée par le client.
Cycles de gel-dégel	:	16 heures en gel à $-18^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ / 8 heures en dégel à $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$
Solution	:	NaCl 3%

2.0 RÉSULTATS

Nombre de cycles	Évaluation visuelle (0 à 5) ⁽¹⁾		Résidus d'écaillage (g)		Perte de masse (kg/m ²)		Moyenne (kg/m ²)
	Éch. n° 1	Éch. n° 2	Éch. n° 1	Éch. n° 2	Éch. n° 1	Éch. n° 2	
10	0	0	0,1	0,3	0,00	0,01	0,01
25	0	0	0,5	0,9	0,01	0,02	0,02
50	1	1	1,3	1,9	0,02	0,03	0,03

⁽¹⁾ Évaluation visuelle

- 0 = Pas d'écaillage
- 1 = Écaillage très léger, profondeur maximale de 3,2 mm, pas de granulats visibles
- 2 = Écaillage léger à moyen
- 3 = Écaillage moyen (certains granulats visibles)
- 4 = Écaillage sévère à moyen
- 5 = Écaillage sévère (granulats visibles sur toute la surface)

Figure 5, Résistance à l'écaillage en présence de sel déglacant selon LS-412

Deux recherches furent effectuées récemment sur l'effet de la cure sur les propriétés du béton. Le premier projet de recherche fut effectué par le NRC : **“Effect of Accelerated Curing Conditions on the Performance of Precast Concrete – Round Robin Phase”**. Ce projet a impliqué neuf usines de préfabrication qui ont produit des échantillons avec des bétons de type C-1 et C-XL. Le rapport fut publié en mars 2014

L'autre projet de recherche fut mené par le professeur Hooton de l'Université de Toronto **“Effects of Different Accelerated and Moist Curing Periods on Chloride Penetration Resistance of Precast Concrete Elements”** comprenant des mélanges de type C-XL réalisé dans une usine et à l'université. Les deux projets de recherche furent menés pour le compte du CPI. Le rapport fut publié en février 2015.

Les résultats de recherche du NRC effectuée sur des mélanges de type C-1 sont montrés aux figures 6 et 7. La figure 7 montre les résultats de résistances en compression et la figure 8 montre les résultats de perméabilité pour les différentes cures effectuées.

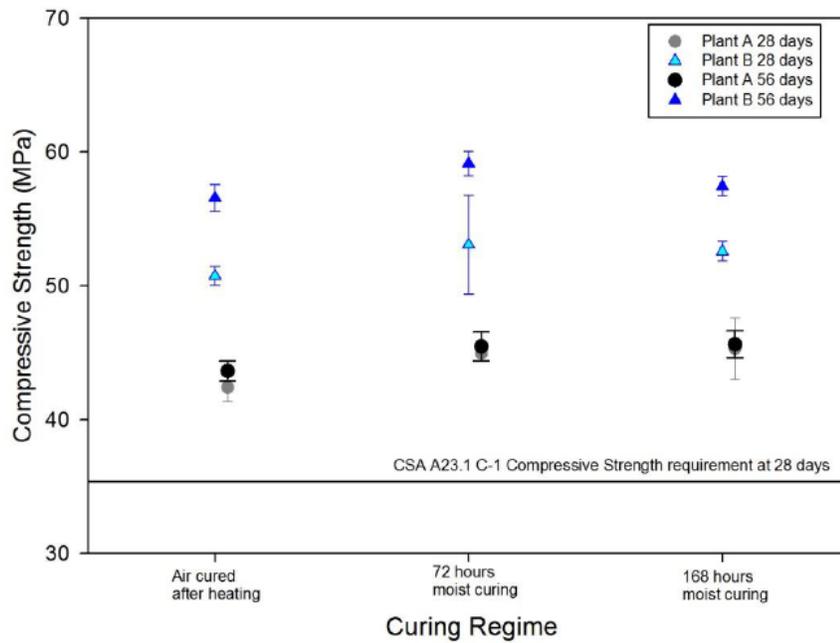


Figure 4 – Effects of curing regime on compressive strength for C-1 mixes (Moving the strength requirement to the same value at 56 days of age has been proposed for CSA A23.1-2014.)

Figure 6 : Résistance à la compression pour les mélanges de type C-1 selon le type de cure

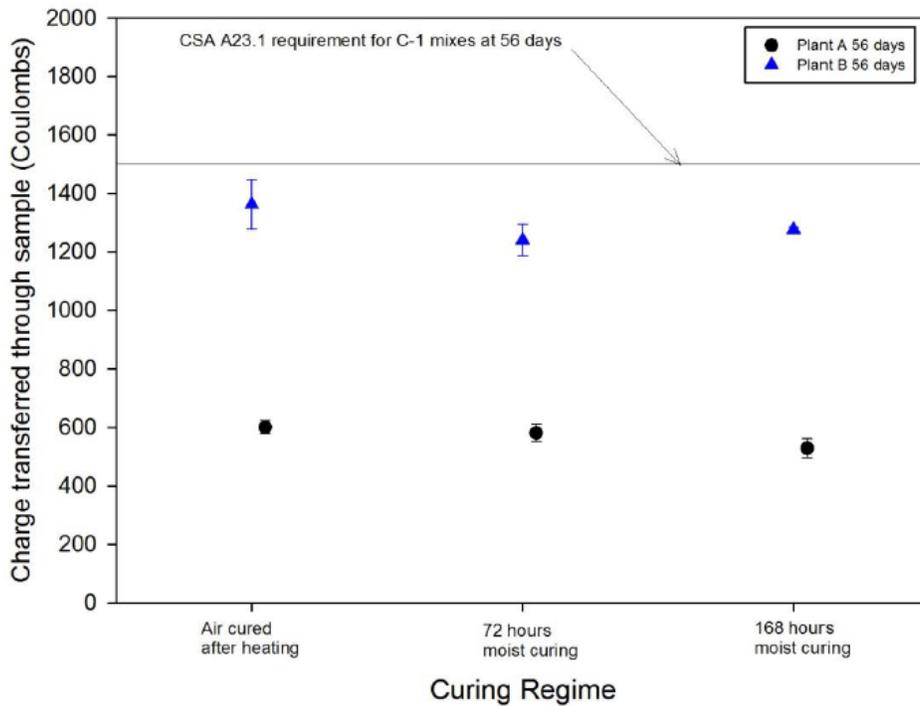


Figure 6 - Effects of curing regime on ASTM C1202 rapid chloride penetration results for C-1 mixes

Figure 7 : Perméabilité pour les mélanges de type C-1 selon le type de cure

Les figures 8 et 9 présentent les résultats de recherche du NRC effectuée sur des mélanges de type C-XL. La figure 8 montre les résultats de résistances en compression et la figure 9 montre les résultats de perméabilité pour les différentes cures effectuées.

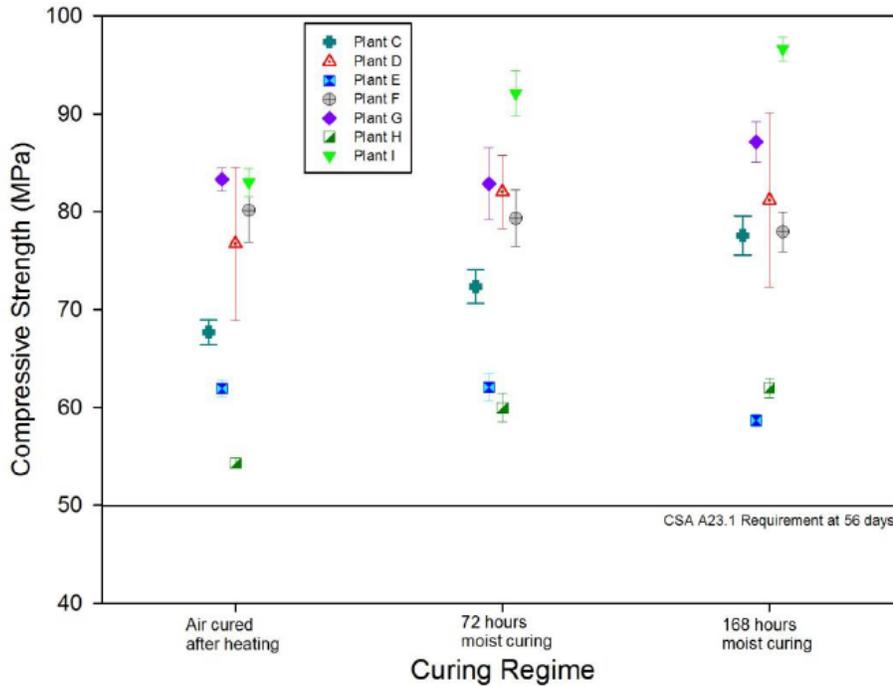


Figure 5 - Effects of curing regime on compressive strength at 56 days of age for C-XL mixes.

Figure 8 : Résistance à la compression pour les mélanges de type C-XL selon le type de cure

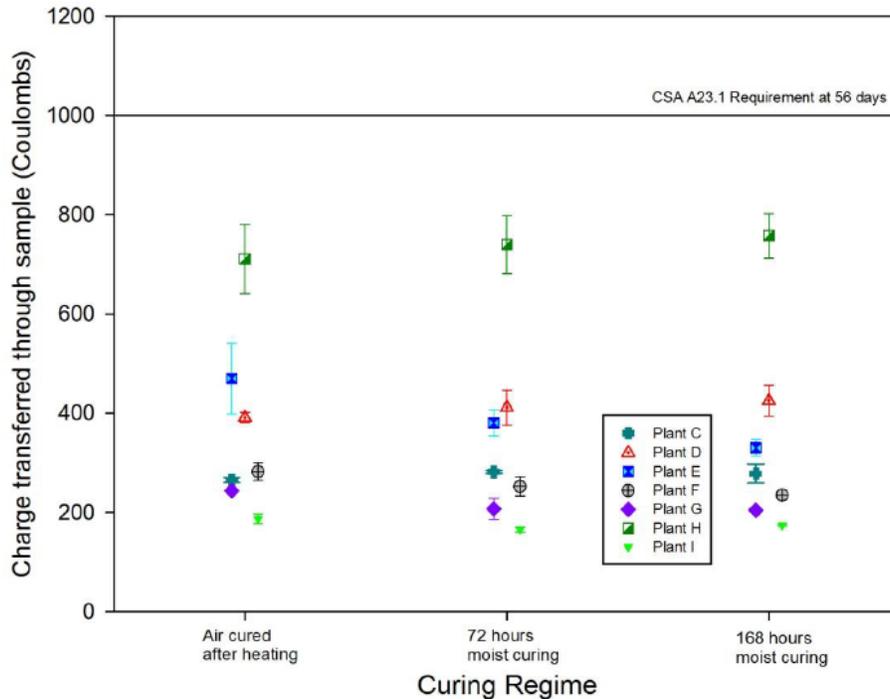


Figure 7 - Effects of curing regime on rapid chloride penetration according to ASTM C1202 at 56 days age for C-XL mixes

Figure 9 : Perméabilité pour les mélanges de type C-XL selon le type de cure

Les tableaux 7, 8 et 9 ci-dessous présentent les résultats de recherche du Professeur Hooton effectués sur des mélanges de type C-XL. Le tableau 7 montre les résultats de résistances à la compression et les tableaux 8 et 9 montrent les résultats de perméabilité pour les différentes cures effectuées.

Table 1. Cylinder strengths

Age	Strength (MPa)	
	Accelerated Curing	Moist Curing
28 days	62.0	69.8
56 days	66.1	73.9
120 days	69.3	74.5

Tableau 7 : Résistance à la compression pour les mélanges de type C-XL selon le type de cure

Table 2. ASTM C1202 and bulk resistivity results on cylinders

Age (days)	ASTM C1202 (Coulombs)		Bulk Resistivity (kohm-cm)			
	Accelerated Cured	Moist Room Cured	Accelerated Cured		Moist Room Cured	
			Merlin	Rcon	Merlin	Rcon
28	340	465	54.1	52.4	35.5	34.9
56	315	375	61.4	59.8	50.2	48.5

Tableau 8 : perméabilité pour les mélanges de type C-XL selon le type de cure

Table 3. ASTM C1202 results on 56 day old cores taken from slabs

Curing Regime	ASTM C1202 (coulombs)
16 h accel. cure; then stored in air	285
16 h accel. cure; moist cured to 72 h; then stored in air	310
16 h accel. cure; moist cured to 168 h; then stored in air	285
7 d moist cured at 23°C	325
16 h accel. cure; then stored to 7 d at cold temp.; then in air at 23°C	290

Tableau 9 : Perméabilité pour les mélanges de type C-XL selon le type de cure

5.0 Discussion

Nos résultats du point de vue de la résistance à la compression montrent que les exigences du Tome VII, de 35 MPa à 28 jours, sont rencontrées sans problème en montrant un avantage pour la cure humide de 7 jours. L'immersion des cylindres dans un bac d'eau à 23 degrés C représente la cure idéale qui peut difficilement être obtenue en conditions de chantier.

Du point de vue de la perméabilité aux ions chlorures, des essais sont en cours, mais les valeurs obtenues précédemment montrent que la cure accélérée permet de rencontrer les exigences du tome VII du MTQ de 1000 Coulombs sans difficulté.

La résistance à l'écaillage est également rencontrée suite à une cure accélérée.

Les résultats obtenus dans les études du NRC et du professeur Hooton de l'université de Toronto montrent également qu'une cure accélérée de 16 heures est suffisante pour obtenir des résultats qui satisfont aux exigences des normes CSA A23.4 et CSA A23.1. La cure humide de 7 jours supplémentaire demandée dans la norme CSA A23.1 pour les types d'exposition C-XL n'apporte pas d'avantage significatif à la cure accélérée.

Comme le stipule l'article 23.4 de la norme CSA A23.4, une usine de béton préfabriqué peut employer des méthodes de cure qui lui sont propres en démontrant que ces méthodes produisent un produit fini qui satisfait ou dépasse les exigences de performance applicables.

6.0 Conclusion

Les résultats obtenus lors des tests effectués par Hanson vont dans le même sens que les conclusions des études du NRC et du professeur Hooton de l'université de Toronto. D'autres tests pourraient être effectués en variant les températures et la durée des cycles de cure accélérée.

Les tests pourraient également être faits avec d'autres types de ciments ou de liants hydrauliques tels que les ciments ternaires ou de type HS et pour d'autres types de mélanges MTQ.

7.0 Références

Makar, J., Kashef, A., "Effect of Accelerated Curing Conditions on the Performance of Precast Concrete – Round Robin Phase", National Research Council of Canada, March 2014

Hooton, R.D., "Effects of Different Accelerated and Moist Curing Periods on Chloride Penetration Resistance of Precast Concrete Elements", University of Toronto, February 2015

CSA A23.4 Béton préfabriqué- Constituants et exécution des travaux, 2009

CSA A23.1-14 / CSA A23.2-14 – Concrete materials and methods of concrete construction / Test methods and standard practices for concrete