



# Rapport sur les causes techniques de l'effondrement du viaduc de la Concorde

## Annexe B1 Essais de caractérisation de matériaux prélevés sur le viaduc de Blois (Essais comparatifs)

Rédigé par :

Jacques Marchand, ing., Ph.D.  
Eric Ouellet, ing. M.Sc.  
Richard Cantin, ing. Ph.D.

Mai 2007



**Service d'Expertise en Matériaux inc.**

**Enquête sur l'effondrement du viaduc de la Concorde**

**Annexe B1 au rapport sur le viaduc de Blois**

**Essais de caractérisation de matériaux prélevés  
sur le viaduc de Blois  
(Essais comparatifs)**

**Service d'Expertise en Matériaux (S.E.M.) inc.**  
1400, boul. du Parc-technologique  
Bureau 203  
Québec (Québec)  
G1P 4R7

## Table des matières

<b>Table des matières .....</b>	<b>2</b>
<b>1 PARTIE I — ESSAIS RÉALISÉS SUR DES CAROTTES DE BÉTON.....</b>	<b>3</b>
1.1 Portée des travaux.....	3
1.2 Prélèvement des carottes .....	4
1.3 Réception des carottes de béton.....	4
1.4 Résultats .....	8
1.4.1 Essais - Caractérisation des propriétés physiques du béton .....	8
1.4.1.1 Détermination de la porosité et de l'absorption .....	8
1.4.1.2 Détermination des caractéristiques du réseau de bulles d'air .....	8
1.4.2 Essais - Caractérisation des propriétés mécaniques.....	9
1.4.2.1 Détermination de la résistance à la compression.....	9
1.4.2.2 Détermination du module d'élasticité .....	10
1.4.2.3 Détermination de la résistance à la traction par écrasement latéral (essai Brésilien).....	11
1.4.3 Essais - Caractérisation des propriétés de transport.....	12
1.4.3.1 Résistance à la pénétration aux ions chlore – ASTM C1202 ....	12
1.4.3.2 Détermination des coefficients de diffusion – ASTM C1202 modifiée .....	13
1.4.3.3 Détermination de la teneur en chlore .....	16
<b>2 PARTIE II — ESSAIS RÉALISÉS SUR DES ÉCHANTILLONS D'ACIER D'ARMATURE .....</b>	<b>18</b>
2.1 Portée des travaux.....	18
2.2 Prélèvement des barres .....	18
2.3 Résultats .....	19
2.3.1 Détermination de la résistance à la traction et de la limite d'élasticité .	19
2.3.2 Détermination de la résistance à l'impact — Essai Charpy .....	20
2.3.3 Détermination de la composition de l'acier .....	20
<b>3 PHOTOS DES CAROTTES .....</b>	<b>22</b>

## INTRODUCTION

La culée sud-est du viaduc de la Concorde s'est effondrée le 30 septembre 2006. Dans les jours qui ont suivi l'effondrement, l'équipe d'experts a été mandatée pour l'élaboration d'un programme expérimental dans le but de caractériser les matériaux (béton et acier) constituant la structure du viaduc de la Concorde, ainsi que celle d'un autre viaduc similaire, le viaduc de Blois. Ce dernier présente des caractéristiques de conception très similaires à celui de la Concorde, notamment un principe de culées en dalle épaisse en porte-à-faux.

Nous avons donc procédé à différents essais sur des carottes de béton et sur des échantillons d'acier prélevés sur différents sites répartis sur l'ensemble du viaduc. Ce rapport décrit le programme d'essai effectué sur le viaduc de Blois et présente les résultats obtenus.

## 1 PARTIE I — ESSAIS RÉALISÉS SUR DES CAROTTES DE BÉTON

### 1.1 Portée des travaux

Les activités suivantes se sont déroulées au cours de la période du 8 octobre 2006 au 16 mars 2007 :

- Prélèvement de carottes de béton;
- Réception des carottes de béton prélevées (photographies, prises de dimensions et de masse);
- Essais :
  - Détermination de la résistance à la compression (CSA A23.2-9C);
  - Détermination du module d'élasticité en compression (ASTM C469-02) ;
  - Détermination de la résistance à la traction par écrasement latéral (CSA A23.2-13C);
  - Détermination de la porosité du béton (ASTM C642);
  - Détermination de la teneur en ions chlore totaux (soluble à l'acide) dans le béton (ASTM C1152);
  - Détermination des caractéristiques du réseau de bulles d'air (ASTM C457) ;
  - Détermination de la perméabilité aux ions chlore (Rapid Chloride Penetration Test) (ASTM C1202);
  - Détermination de la perméabilité aux ions chlore - Migration (ASTM C1202 modifiée).

## 1.2 Prélèvement des carottes

Les 8, 9 et 20 octobre 2006, un total de 37 carottes ont été prélevées sur la structure du viaduc de Blois. De ce nombre, 16 ont été remises au ministère des Transports du Québec (MTQ). Le présent rapport ne porte pas sur les 16 carottes remises au ministère des Transports, mais les Tableaux B1-1 à B1-4 présentent tout de même la description de celles-ci.

Les 4 sites d'échantillonnage répartis sur les deux culées ont été sélectionnés par les représentants du ministère des Transports. Tous les résultats d'essais présentés dans le présent rapport proviennent de carottes de béton prélevées sur ces 4 sites. Les sites 4 et 5 représentaient des fenêtres d'observation sur la face nord des culées est et ouest et aucune carotte n'y a été prélevée. L'emplacement de chacun des sites est illustré à la Figure B1-1.

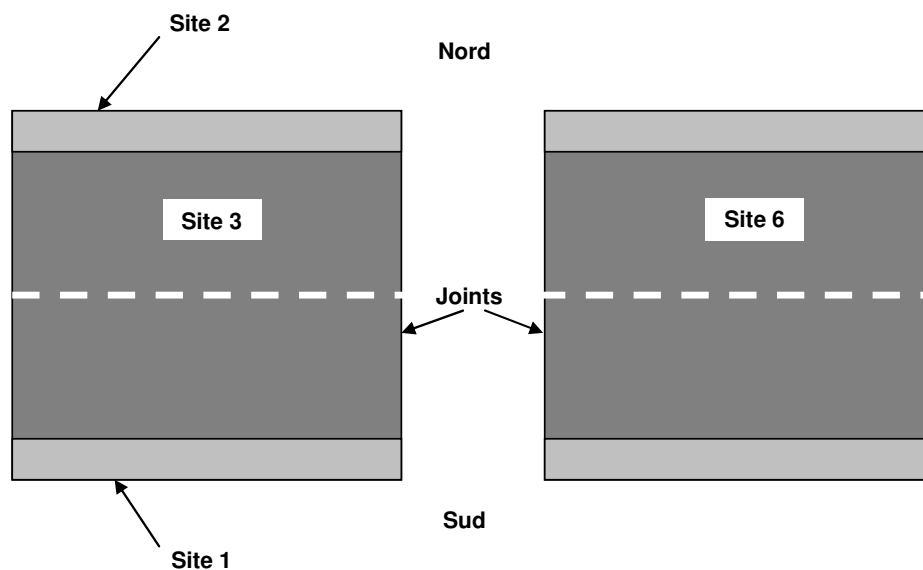


Figure B1-1 – Sites d'échantillonnage

## 1.3 Réception des carottes de béton

Ces opérations se sont déroulées entre le 16 et le 25 octobre 2006 selon les recommandations des normes ASTM C42 (04) — *Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete* et ASTM C1542 (02) — *Standard Test Method for Measuring Length of Concrete Cores*. Pour chacune des pièces prélevées, les opérations suivantes ont été réalisées:

- examen visuel et relevé des fissures, des barres d'armature et d'autres particularités observables à l'œil nu;
- prise de photographies;
- deux mesures de diamètre;
- quatre mesures de longueur;
- mesure de masse à la réception.

L'identification détaillée, les dimensions moyennes et la masse des carottes sont présentées pour chacun des sites aux Tableaux B1-1 à B1-4. Les photographies des carottes se retrouvent à la section 3 à la fin du présent rapport. À titre informatif, les propriétés des 16 carottes remises au ministère des Transports ont été incluses dans les Tableaux B1-1 à B1-4. Pour les sites 1 et 2, les carottes ont été numérotées de façon séquentielle de 1 à 4. Pour les sites 3 et 6, le code d'identification est composé du numéro du site et d'une lettre. Les lettres F et I sont volontairement omises. Lorsqu'une carotte a été extraite en plusieurs pièces, celles-ci sont identifiées en ordre numérique à partir de la surface.

Tableau B1-1 – Identification des carottes de béton - Site 1  
Culée sud-ouest - Horizontale

Identification	Diamètre <sup>a</sup> (mm)	Longueur <sup>b</sup> (mm)	Masse (g)	Remarque
C3	101	278	5 406	
C4	102	290	5 568	Remise au MTQ

<sup>a</sup> Moyenne de 2 mesures

<sup>b</sup> Moyenne de 4 mesures

Tableau B1-2 – Identification des carottes de béton - Site 2  
Culée nord-ouest - Horizontale

Identification	Diamètre <sup>a</sup> (mm)	Longueur <sup>b</sup> (mm)	Masse (g)	Remarque
C1	102	264	4 981	
C2	102	381	4 166	Remise au MTQ

<sup>a</sup> Moyenne de 2 mesures

<sup>b</sup> Moyenne de 4 mesures

Tableau B1-3 – Identification des carottes de béton - Site 3  
Culée ouest - Verticale

Identification	Diamètre <sup>a</sup> (mm)	Longueur <sup>b</sup> (mm)	Masse (g)	Remarque
A-1	75	140	1 639	Remise au MTQ
A-2	74	228	2 348	Remise au MTQ
B-1	76	209	2 198	
B-2	76	142	1 506	
C-1	74	333	3455	Remise au MTQ
C-2	75	359	3 677	Remise au MTQ
D	76	216	2 273	
E-1	101	137	2586	
E-2	101	310	5 847	
G-1	101	274	5 171	
G-2	102	156	2 932	
H-1	101	144	2 826	Remise au MTQ
H-2	101	264	5 016	Remise au MTQ
J-1	101	140	3 051	
J-2	101	295	5 525	
K-1	101	101	1 906	Remise au MTQ
K-2	101	334	6 575	Remise au MTQ
L-1	101	138	2 708	
L-2	101	311	5 805	
M	101	72	1 478	
N	76	96	1 014	
O-1	101	138	2 639	
O-2	101	273	5 091	
P	100	434	8 191	Remise au MTQ
Q	101	434	8 252	
R-1	101	260	4 810	
R-2	101	194	3 581	
S	100	265	4 939	Remise au MTQ

<sup>a</sup> Moyenne de 2 mesures

<sup>b</sup> Moyenne de 4 mesures

Tableau B1-4 – Identification des carottes de béton - Site 6  
Culée est - Verticale

Identification	Diamètre <sup>a</sup> (mm)	Longueur <sup>b</sup> (mm)	Masse (g)	Remarque
A	101	402	7 416	Remise au MTQ
B	101	445	8 398	
C	101	333	6 134	Remise au MTQ
D	101	351	6 447	
E	101	399	7 247	Remise au MTQ
G	101	267	8 273	
H	101	411	8 356	Remise au MTQ
J	101	333	6 437	
K	101	438	8 214	Remise au MTQ
L-1	100	131	2 465	
L-2	101	303	5 577	
M	100	375	7 099	Remise au MTQ
N-1	101	139	2 783	
N-2	101	247	4 524	
O-1	101	163	3 194	
O-2	101	226	4 736	
P-1	101	72	1 386	Remise au MTQ
P-2	101	93	1 968	Remise au MTQ
P-3	95	66	1 215	Remise au MTQ
Q	102	431	7 957	Remise au MTQ
R	101	422	7 663	

<sup>a</sup> Moyenne de 2 mesures

<sup>b</sup> Moyenne de 4 mesures

## 1.4 Résultats

### 1.4.1 Essais - Caractérisation des propriétés physiques du béton

#### 1.4.1.1 Détermination de la porosité et de l'absorption

Les essais de porosité et d'absorption ont eu lieu du 15 au 21 décembre 2006. Au total, 4 échantillons répartis sur 2 sites ont été testés en conformité avec la norme ASTM C642 (06) — *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. Suite à la réception des carottes de béton, des échantillons cylindriques d'un volume minimum de 350 cm<sup>3</sup> ont été prélevés sur les carottes sélectionnées. Dans ce rapport, le terme « porosité » est utilisé pour désigner le volume de vides perméables à l'eau. Les résultats obtenus pour chaque site sont présentés au Tableau B1-5 et proviennent de la moyenne des 2 mesures.

Les porosités mesurées varient entre 15,1% et 15,2%. La porosité moyenne est de 15,2% et l'écart type est de 0,07%. Les mesures d'absorption varient entre 6,93% et 6,95%. L'absorption moyenne est de 6,94% et l'écart type est de 0,01%.

Tableau B1-5 – Absorption et porosité du béton

Site	Absorption (%) *	Porosité (%)
3	6,93	15,1
6	6,95	15,2
<i>Moyenne :</i>	<i>6,94</i>	<i>15,2</i>
<i>Écart type:</i>	<i>0,01</i>	<i>0,07</i>

\* Absorption après ébullition

#### 1.4.1.2 Détermination des caractéristiques du réseau de bulles d'air

Ces essais ont été réalisés les 12 et 13 mars 2007. Les caractéristiques du réseau de bulles d'air entraîné ont été évaluées selon les recommandations de la norme ASTM C457 (06) — *Standard Test Method for Microscopical Determination of Parameters of the Air-Void System in Hardened Concrete*. Cette procédure est une méthode statistique qui consiste à examiner sous un microscope une succession de points également répartis sur une plaque de béton polie. Les principaux résultats obtenus sont la teneur en air, la surface spécifique et le facteur d'espacement des bulles d'air.

Les valeurs mesurées sur les carottes prélevées sur les différents sites sont présentées au Tableau B1-6. La teneur en air mesurée pour les 2 sites est de 7,0%. Le facteur d'espacement varie entre 190  $\mu\text{m}$  et 240  $\mu\text{m}$  avec une moyenne de 205  $\mu\text{m}$  et un écart type de 21  $\mu\text{m}$ . La surface spécifique varie entre 17,9  $\text{mm}^{-1}$  et 19,8  $\text{mm}^{-1}$  avec une moyenne de 18,9  $\text{mm}^{-1}$  et un écart type de 1,3  $\text{mm}^{-1}$ .

Tableau B1-6 – Caractéristiques du réseau de bulles d'air

Site	Teneur en air (%)	Surface spécifique ( $\text{mm}^{-1}$ )	Facteur d'espacement ( $\mu\text{m}$ )
3	7,0	17,9	240
6	7,0	19,8	190
<i>Moyenne :</i>	<i>7,0</i>	<i>18,9</i>	<i>205</i>
<i>Écart type:</i>	<i>0</i>	<i>1,3</i>	<i>21</i>

#### 1.4.2 Essais - Caractérisation des propriétés mécaniques

##### 1.4.2.1 *Détermination de la résistance à la compression*

Les essais de résistance à la compression ont eu lieu le 12 janvier 2007. La résistance à la compression de toutes les éprouvettes de béton a été mesurée selon les prescriptions de la norme CSA A23.2-9C – *Détermination de la résistance en compression d'éprouvettes de béton cylindriques*. Avant les essais, les extrémités des éprouvettes ont été préparées par meulage.

Les résultats sont présentés au Tableau B1-7. Chaque résistance à la compression inscrite représente la moyenne de trois mesures individuelles, sauf lorsqu'indiqué. Les résistances mesurées pour les différents sites varient entre 30,6 et 44,0 MPa. La valeur moyenne est de 38,1 MPa et l'écart type est de 5,6 MPa.

Tableau B1-7 – Résistance à la compression du béton

Site	Nombre d'essais	Résistance à la compression (MPa)
1	1	44,0
2	1	39,3
3	3	38,4
6	3	30,6
<i>Moyenne :</i>		<i>38,1</i>
<i>Écart type:</i>		<i>5,6</i>

#### 1.4.2.2 Détermination du module d'élasticité

Les essais de module élastique ont été réalisés le 12 janvier 2007. Le module d'élasticité a été mesuré lors des essais de résistance à la compression selon la procédure prescrite par la norme ASTM C469 (02) — *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*. Un compressomètre sur lequel était monté un LVDT a été utilisé afin de mesurer la déformation du béton. La longueur de référence utilisée était supérieure à 100 mm, soit la moitié de la hauteur des carottes. Avant les essais, les extrémités des éprouvettes ont été préparées par meulage.

Les résultats de module élastique sont présentés au Tableau B1-8. Chaque valeur inscrite représente la moyenne de deux mesures individuelles. Les modules élastiques pour les deux sites sont de 19,6 et 20,1 GPa. La valeur moyenne est de 19,9 GPa.

Tableau B1-8 – Module d'élasticité

Site	Nombre d'essais	Module d'élasticité (GPa)
3	2	19,6
6	2	20,1
<i>Moyenne :</i>		<i>19,9</i>
<i>Écart type:</i>		<i>-</i>

### 1.4.2.3 Détermination de la résistance à la traction par écrasement latéral (essai Brésilien)

Ces essais se sont déroulés le 20 décembre 2006. La résistance à la traction du béton a été déterminée par écrasement latéral selon la norme CSA A23.2-13C — *Détermination de la résistance à la traction par écrasement latéral d'éprouvettes de béton cylindriques*. Pour déterminer la résistance à la traction de l'éprouvette de béton, celle-ci doit être placée à l'intérieur d'un support spécialement conçu (Figure B1-2). Ce dispositif est constitué de deux plaques d'appui (une sur la surface supérieure et l'autre sur la surface inférieure) qui permettent à la charge d'être appliquée sur toute la longueur de l'éprouvette. Des bandes d'appui faites de contreplaqué de 25 mm de largeur x 3 mm d'épaisseur sont également placées entre les plaques d'appui et l'éprouvette afin de distribuer la charge uniformément. Quatre supports latéraux sont utilisés afin d'empêcher les sections de l'éprouvette de tomber après la fracture.

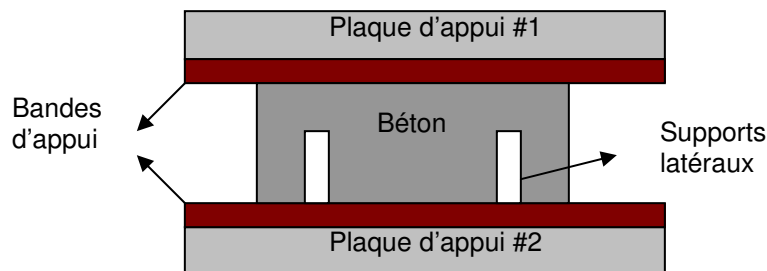


Figure B1-2 – Montage utilisé pour la détermination de la résistance à la traction du béton

Après la fracture de l'éprouvette, les morceaux ont été déposés sur une table pour procéder au comptage des granulats fracturés. Pour chaque site de prélèvement de carottes, 3 essais ont été effectués. Le Tableau B1-9 présente les résultats obtenus pour chaque site de prélèvement. Pour les 2 sites évalués, les résistances à la traction sont de 2,6 et 2,2 MPa et la moyenne est de 2,4 MPa.

Tableau B1-9 – Résistance à la traction du béton

Site	Nombre d'essais	Proportion de granulats fracturés (%)	Résistance à la traction (MPa)
3	3	74	2,6
6	3	74	2,2
Moyenne =			2,4
Écart-type =			-

#### 1.4.3 Essais - Caractérisation des propriétés de transport

##### 1.4.3.1 *Résistance à la pénétration aux ions chlore – ASTM C1202*

Les essais de pénétration des ions chlore ont eu lieu le 19 décembre 2006. L'essai pour la détermination de la perméabilité aux ions chlore est réalisé selon la norme ASTM C1202 (05) - *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. Pour chaque site où des carottes ont été prélevées, deux essais ont été effectués. La Figure B1- 3 illustre le montage utilisé.

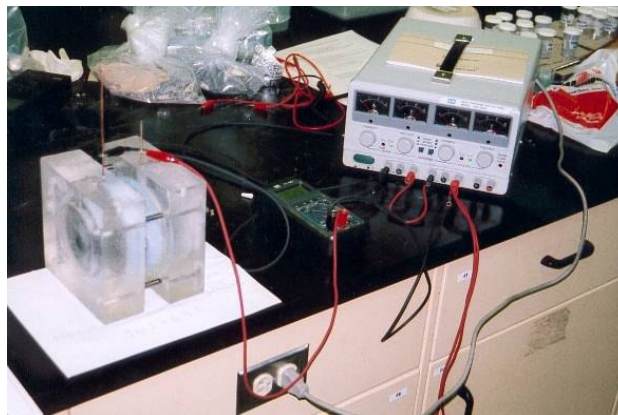


Figure B1- 3 – Montage utilisé pour la détermination de la perméabilité aux ions chlore

L'essai consiste à mesurer la quantité de courant qui passe dans une rondelle de béton de 51 mm (2 pouces) d'épaisseur ayant un diamètre extérieur de 102 mm (4 pouces) et un diamètre exposé de 96 mm (3,75 pouce). Chaque surface de la rondelle est en contact avec une cellule qui contient une solution différente. La cellule en amont est remplie d'une solution de 500 mmol/l de NaCl tandis que celle en aval est remplie d'une solution de 300 mmol/l de NaOH.

Une source d'énergie externe est utilisée afin d'induire un courant à l'intérieur du béton. La borne négative de la source est connectée à la cellule en amont et la borne positive est connectée à la cellule en aval. Le voltage appliqué est de  $60 \text{ V} \pm 0.1 \text{ V}$ . Durant l'essai, le courant et la température de la solution de NaCl sont mesurés approximativement à toutes les 30 minutes et ce, pendant une durée de 6 heures. Lorsque la température atteint  $90^\circ\text{C}$ , la norme recommande d'arrêter l'essai pour éviter que les cellules ne soient endommagées ou qu'il n'y ait ébullition de la solution. À la fin de l'essai, la charge totale (courant (I) x temps (s) mesurée en coulombs), permet d'obtenir un indice de la perméabilité du béton à la pénétration des ions chlore.

Le Tableau B1-10 présente les résultats obtenus pour les différents sites de prélèvement. La perméabilité au chlore varie de haute à très haute pour les deux sites de prélèvement.

Tableau B1-10 – Résultats de l'essai accéléré de pénétration des ions chlore

Site	Charge (Coulombs)		Perméabilité	
	Essai 1	Essai 2	Essai 1	Essai 2
3	9 914	7 772*	Haute	Très haute
6	5 000	8 714*	Haute	Très haute

\* Essai arrêté dû à une température élevée de la solution

#### 1.4.3.2 Détermination des coefficients de diffusion – ASTM C1202 modifiée

Les essais de détermination du coefficient de diffusion se sont échelonnés sur une période allant du 20 décembre 2006 au 5 janvier 2007 pour l'extraction de solution interstitielle, du 19 décembre 2006 au 4 janvier 2007 pour l'essai de migration et le 16 mars 2007 pour le calcul des coefficients de diffusion. La détermination des coefficients de diffusion est réalisée à partir des résultats de l'essai de porosité,

d'un essai de migration et de l'analyse de la composition de la solution interstitielle du béton.

L'essai de migration consiste en une version modifiée et améliorée de l'essai ASTM C 1202 (*Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ions Penetration*). Il en diffère par trois paramètres:

	Norme ASTM C1202	Essai modifié
Potentiel imposé	60V	20V
Volume de solution	± 100 ml	± 2800 ml
Durée de l'essai	6 h	Environ 7 jours

Le volume de solution est plus grand que celui prescrit par la norme afin de maintenir des conditions d'exposition constantes durant tout l'essai (température, concentration, etc.). Le montage est illustré à la Figure B1- 4.

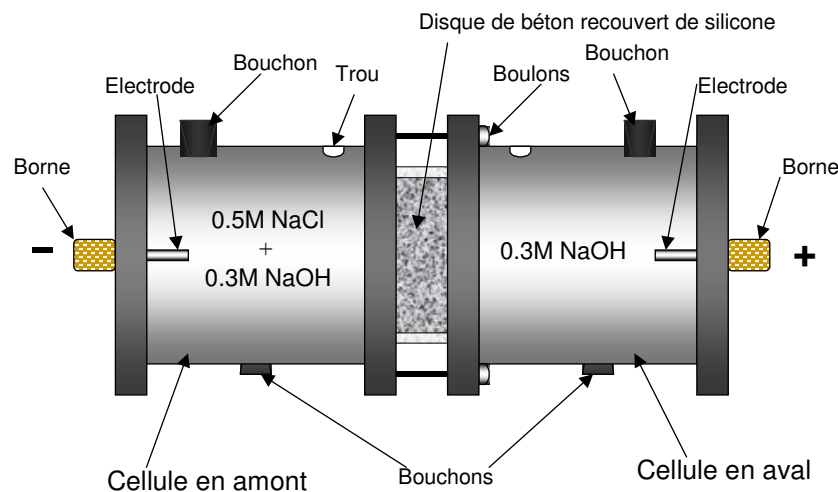


Figure B1- 4 – Schéma du montage expérimental pour l'essai de migration modifié

Avant la réalisation des essais, les disques de béton testés ont été saturés sous vide (pour une période de 18 à 24 heures) dans une solution d'hydroxyde de sodium (NaOH à 300 mmol/l). Par la suite, les éprouvettes ont été fixées aux cellules de migration (voir Figure B1- 3). L'étanchéité des cellules était assurée par du scellant au silicone et de la graisse de silicone. La cellule en amont a ensuite

été remplie d'une solution de 300 mmol/l de NaOH et de 500 mmol/l de NaCl. La cellule en aval contenait quant à elle une solution de 300 mmol/l de NaOH. Une fois les solutions en place, le potentiel électrique a été appliqué par l'entremise d'électrodes fixées aux cellules. Celui-ci a été maintenu pour toute la durée de l'essai.

La solution interstitielle du béton a été extraite selon la procédure décrite par Barneyback et Diamond<sup>1</sup>. Selon cette procédure, des fragments de béton sont placés dans une cellule d'extraction et broyés sous une pression d'environ 500 MPa. La solution ainsi obtenue s'écoule par un drain et est immédiatement recueillie au moyen d'une seringue afin d'éviter toute contamination par l'atmosphère. Une analyse de la solution interstitielle a ensuite été effectuée pour déterminer la concentration des ions hydroxyde (OH<sup>-</sup>), sodium (Na<sup>+</sup>), potassium (K<sup>+</sup>), sulfate (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), calcium (Ca<sup>2+</sup>) et chlore (Cl<sup>-</sup>).

Des simulations numériques ont été réalisées avec le logiciel STADIUM<sup>MD</sup>-ACC à partir de la composition de la solution interstitielle, des mesures de porosité et des essais de migration ionique sous champ électrique. Ces simulations visaient à déterminer les coefficients de diffusion des principales espèces ioniques présentes dans la solution des pores.

Pour chacun des sites analysés, deux calculs de coefficients de diffusion ont été réalisés. Le Tableau B1-11 présente les résultats des coefficients de diffusion. Le coefficient de diffusion varie entre 40,0 et 44,5 x 10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>/s avec une moyenne de 42,5 x 10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>/s et un écart type de 3,2 x 10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>/s.

Tableau B1-11 — Coefficients de diffusion  
STADIUM-ACC<sup>®</sup>

Site	Coefficient de diffusion x 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s		
	Essai 1	Essai 2	Moyenne
3	49,0	40,0	44,5
6	38,0	42,0	40,0
		<i>Moyenne =</i>	<i>42,3</i>
		<i>Écart-type =</i>	<i>3,2</i>

<sup>1</sup> Barneyback R.S., & Diamond S. (1981). Expression and analysis of pore fluids from hardened cement pastes and mortars. *Cement and Concrete Research* 11, pp. 279-285.

### 1.4.3.3 Détermination de la teneur en chlore

Les essais de détermination de la teneur en ions chlore ont eu lieu du 19 au 21 décembre 2006. La teneur en chlore dans le béton a été déterminée selon la norme ASTM C1152-(04) – *Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete*. La profondeur des incréments a été sélectionnée selon la longueur de la carotte afin de produire un profil de teneur en chlore représentatif. La quantité de mesures prises pour chaque carotte dépend donc de la longueur de celle-ci ainsi que de la présence d'armatures. La distance entre les incréments varie entre 12,5 mm (0,5 pouce) et 50 mm (2 pouces).

Pour réaliser les mesures de teneur en chlore, la poudre de béton a été obtenue en forant l'éprouvette à chaque incrément de profondeur à l'aide d'une mèche. Des mesures ont été prises afin de s'assurer que la poudre passait le tamis # 20 (850 µm). La teneur en chlore a ensuite été déterminée selon la procédure décrite par la norme. La Figure B1-5 présente les profils de chlore obtenus. Pour fins de comparaison, tous les sites se retrouvent sur le même graphique.

La carotte E-1 provenant du site vertical 3 présente une contamination en chlore sur une profondeur minimale de 120 mm (voir Figure B1-5). Les carottes verticales provenant du site 6 (L et N) et la carotte O-1 provenant du site 3 ne présentent pas de contamination au chlore.

L'emplacement des trous de carottage est illustré de façon schématique à la Figure B1-6.

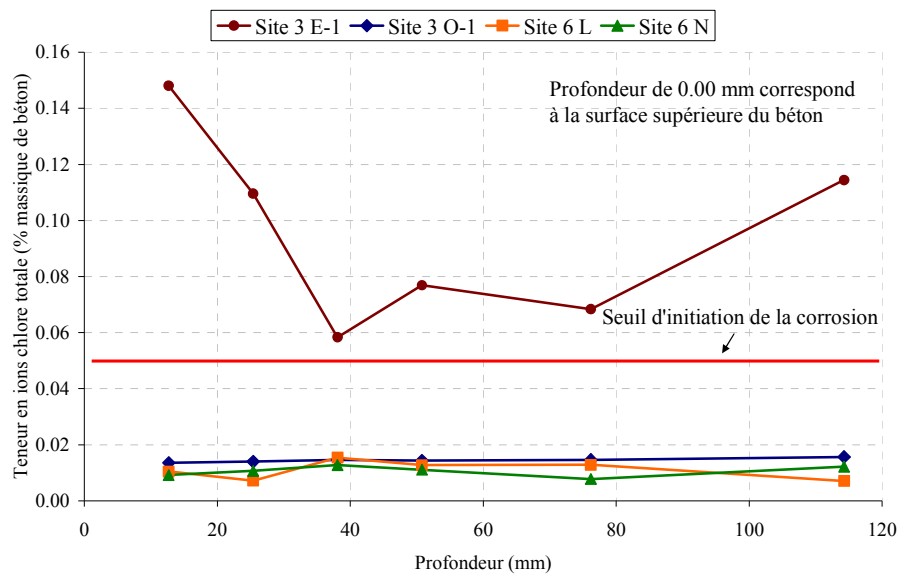


Figure B1-5 – Profils de chlore des sites 3 et 6 – Carottes verticales

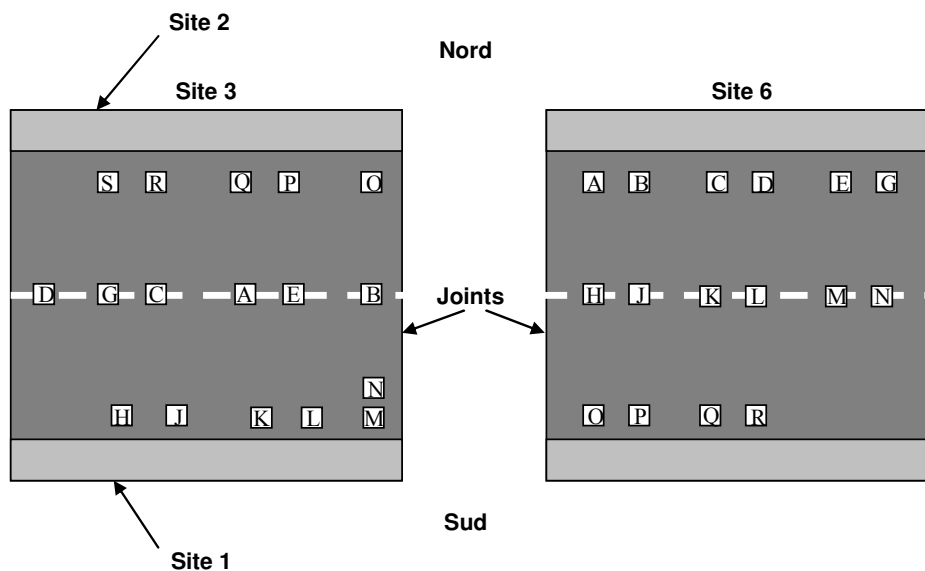


Figure B1- 6 -Emplacement schématique des trous de carottage des sites 3 et 6  
(Note : Pas à l'échelle)

## 2 PARTIE II — ESSAIS RÉALISÉS SUR DES ÉCHANTILLONS D'ACIER D'ARMATURE

### 2.1 Portée des travaux

Les activités suivantes se sont déroulées d'octobre 2006 à février 2007 :

- Prélèvement de barres d'acier;
- Réception des barres prélevées (prises de dimensions);
- Essais :
  - Détermination de la résistance à la traction (CSA G30 18-M92; ASTM A370);
  - Détermination de la résistance à l'impact — Essai Charpy (ASTM C370);
  - Détermination de la composition (Combustion / infra-rouge et torche au plasma (Inductively Coupled Plasma)).

### 2.2 Prélèvement des barres

Les 10 et 21 octobre 2006, des barres ont été prélevées dans les fenêtres d'observation sur le viaduc de Blois. En tout, 6 barres ont été prélevées. Chacune des barres a été divisée en deux parties égales et la moitié de chacune a été remise au MTQ. L'information relative aux barres prélevées est donnée au Tableau B1-12.

Tableau B1-12 – Caractéristiques des barres d'acier prélevées

Nombre de barres	Identification	Site	Grosueur	Dimensions (mm)
1	Barre #14 Bande Centrale	Culée ouest	#14	1710
2	Barre #6 / Bande sud-ouest	Culée ouest	#6	1150 et 820
1	Barre #8/ Fenêtre 2 sud-est	Culée est	#8	900
2	Barre #14 / Remises par un représentant du MTQ	Culée est (non-confirmé)	#14	1240 et 1130

Parmi les 6 barres prélevées, 4 ont été soumises aux essais. Ces barres sont énumérées au Tableau B1-13.

Tableau B1-13 – Barres d'acier testées prélevées

Barre #	Identification	Site	Grosneur
1	Barre #8/ Fenêtre 2 sud-est	Culée est	#8
2	Barre #6 / Bande sud-ouest (1/2)	Culée ouest	#6
3	Remis par MTQ (1/2)	Culée est	#14
4	Barre #14 Bande Centrale	Culée ouest	#14

## 2.3 Résultats

### 2.3.1 Détermination de la résistance à la traction et de la limite d'élasticité

Les essais de traction ont eu lieu le 27 février 2007. La résistance à la traction et la limite d'élasticité de toutes les barres d'acier ont été mesurées selon les prescriptions de la norme CSA G30 18-M92 — *Barres d'acier en billettes pour l'armature du béton* qui à son tour réfère à la norme ASTM A370 — *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*.

Les essais n'ont pas été réalisés sur des barres de plein diamètre comme la norme CSA G30 18-M92 le recommande aux fabricants d'acier pour fins d'estampillage, mais sur des éprouvettes de section réduite, tel que permis par la norme ASTM A370. Ce choix a été motivé par la présence d'imperfections sur les barres (rouille) et par la capacité des équipements (presse, extensomètre, mâchoires de retenue). Préalablement à chaque essai, toutes les barres ont été machinées afin d'obtenir une section réduite de  $0,25 \pm 0,005$  pouce ( $6,25 \pm 0,12$  mm) de diamètre. Toutes les dimensions et tolérances des barres testées répondent aux critères prescrits par la norme ASTM A370. Les résultats de limite d'élasticité, de résistance à la traction et de module élastique sont présentés au Tableau B1-14. Pour chaque barre, deux essais ont été réalisés.

Tableau B1-14 – Limite d'élasticité (fy), résistance à la traction (ft) et module élastique (E)

Barre	Identification	fy (MPa)		ft (MPa)		E (GPa)	
		1	2	1	2	1	2
1	Barre #8/ Fenêtre 2 sud-est	408	412	726	729	212	184
2	Barre #6 / Bande sud-ouest (1/2)	445	444	724	722	189	174
3	Remis par MTQ (1/2)	342	348	674	689	238	221
4	Barre #14 Bande Centrale	465	465	781	785	188	207

La limite d'élasticité varie de 342 à 465 MPa, la résistance à la traction varie de 674 à 785 MPa et le module élastique varie de 174 à 238 GPa.

### 2.3.2 Détermination de la résistance à l'impact — Essai Charpy

Ces essais ont eu lieu le 30 janvier 2007. La résistance à l'impact a été mesurée selon les recommandations de la norme ASTM A370 — *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*. L'essai consiste à laisser tomber un pendule sur une éprouvette placée sur appui simple. Préalablement à chaque essai, toutes les barres ont été machinées afin d'obtenir des éprouvettes de 10 mm x 10 mm x 55 mm. Une encoche de 2 mm de profondeur et 45° d'angle a été pratiquée au centre d'une des faces, à l'opposé exact du point d'impact. En plus des dimensions de l'éprouvette, les dimensions de la tête d'impact, des appuis (l'enclume), l'énergie d'impact, la vitesse du pendule et la température de l'essai sont prescrits par la norme de référence. Étant donné que, pour un appareil donné, la masse du pendule et la hauteur de chute sont constantes et connues, l'énergie d'impact l'est aussi. La valeur mesurée consiste en l'énergie absorbée lors de l'impact par l'éprouvette. Plus l'énergie est élevée, plus l'acier est ductile. Les résultats obtenus sont présentés au Tableau B1-15.

Tableau B1-15 – Énergie absorbée lors de l'essai de résistance à l'impact de type Charpy

Barre	Identification	Énergie (Joules)	
		1	2
1	Barre #8/ Fenêtre 2 sud-est	11	-
2	Barre #6 / Bande sud-ouest (1/2)	17	28
3	Remis par MTQ (1/2)	7	8
4	Barre #14 Bande Centrale	16	11

Il est à noter que toutes les éprouvettes ont été prélevées dans le sens de la longueur des barres. On remarque que les résultats sont variables pour chacune des barres et aussi variables d'une barre à l'autre. Les valeurs d'énergie absorbée mesurées varient de 7 à 28 Joules.

### 2.3.3 Détermination de la composition de l'acier

Les essais de composition de l'acier ont été réalisés le 26 février 2007. La norme CSA G30 18-M92 — *Barres d'acier en billettes pour l'armature du béton* recommande certaines limites de teneur pour différents éléments composant l'acier. Ces limites sont imposées aux fabricants d'acier, pour fins de contrôle de la qualité, lors d'analyses réalisées sur coulée.

Les résultats d'analyses de composition sont présentés au Tableau B1-16. Trois barres ont été évaluées, soit les barres 1, 2 et 4. Pour le carbone et le soufre, les teneurs ont été déterminées par combustion et infra-rouge (Combustion and Infrared) et pour le phosphore et le manganèse, la méthode utilisée est celle de la torche au plasma (Inductively Coupled Plasma).

Tableau B1-16 – Teneurs en carbone (C), soufre (S), manganèse (Mn) et phosphore (P) mesurées sur différentes barres d'acier

Barre	Identification	Teneur (%)			
		C	S	Mn	P
1	Barre #8/ Fenêtre 2 sud-est	0.500	0.048	0.700	0.027
2	Barre #6 / Bande sud-ouest (1/2)	0.420	0.019	1.000	0.008
4	Barre #14 Bande Centrale	0.464	0.020	1.100	0.020

### **3 PHOTOS DES CAROTTES**

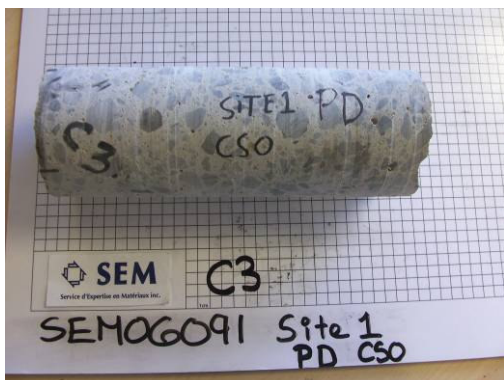


Figure B1-7 – Site 1  
Carotte C3

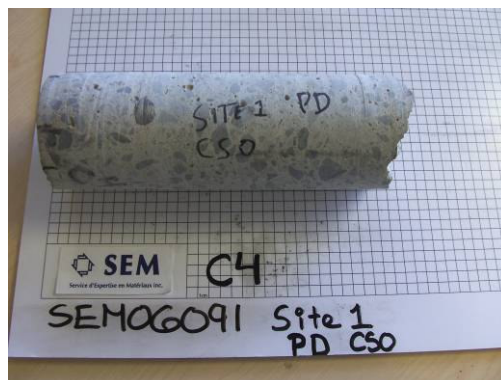


Figure B1-8 – Site 1  
Carotte C4



Figure B1-9 – Site 2  
Carotte C1

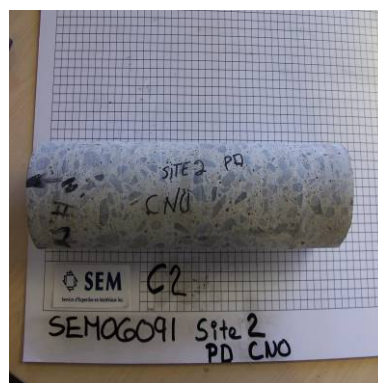


Figure B1-10 – Site 2  
Carotte C2

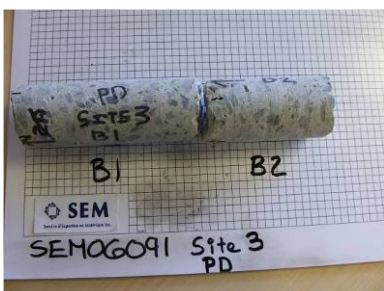


Figure B1-11 – Site 3  
Carotte B-1, B-2

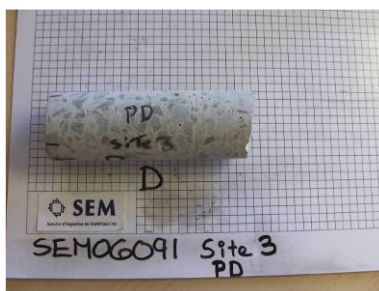


Figure B1-12 – Site 3  
Carotte D



Figure B1-13 – Site 3  
Carotte E-1, E-2

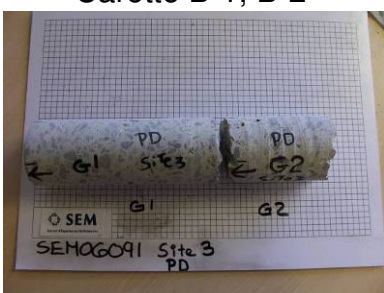


Figure B1-14 – Site 3  
Carotte G-1

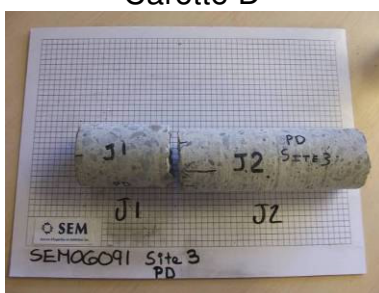


Figure B1-15 – Site 3  
Carotte J-1, J-2

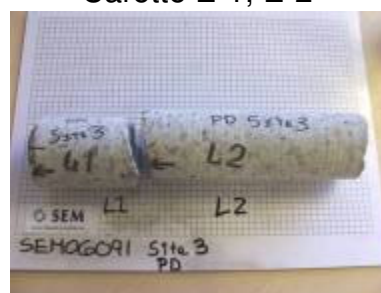


Figure B1-16 – Site 3  
Carotte L-1, L-2

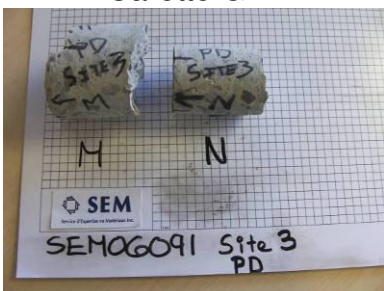


Figure B1-17 – Site 3  
Carotte M, N

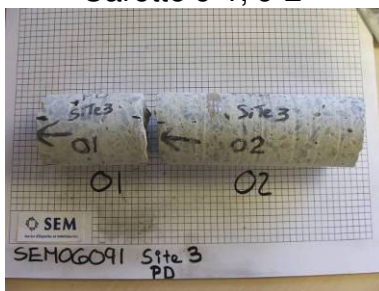


Figure B1-18 – Site 3  
Carotte O-1, O-2

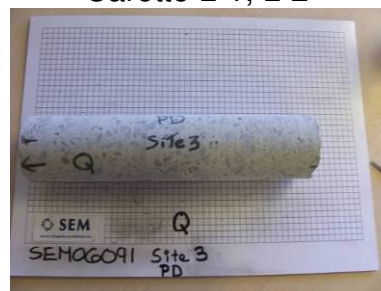


Figure B1-19 – Site 3  
Carotte Q

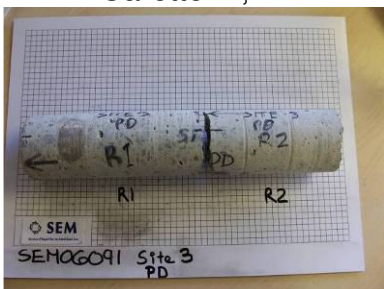


Figure B1-20 – Site 3  
Carotte R-1, R-2

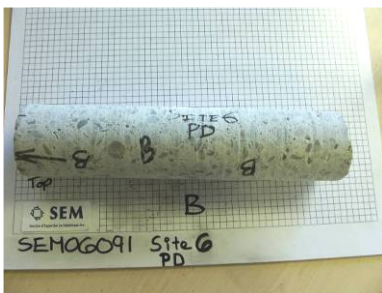


Figure B1-21 – Site 6  
Carotte B

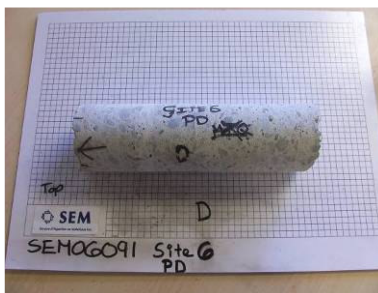


Figure B1-22 – Site 6  
Carotte D

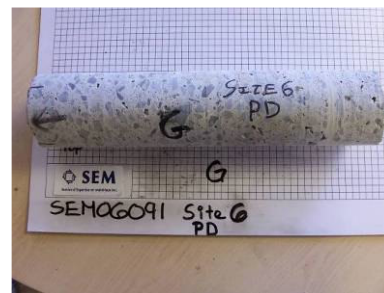


Figure B1-23 – Site 6  
Carotte G

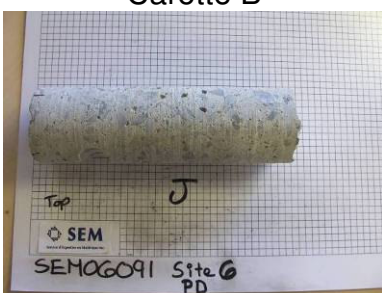


Figure B1-24 – Site 6  
Carotte J

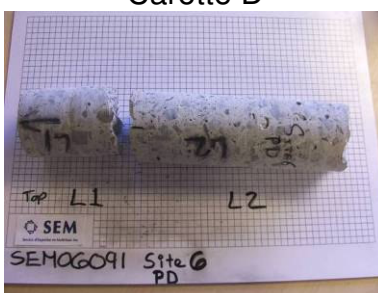


Figure B1-25 – Site 6  
Carotte L-1, L-2

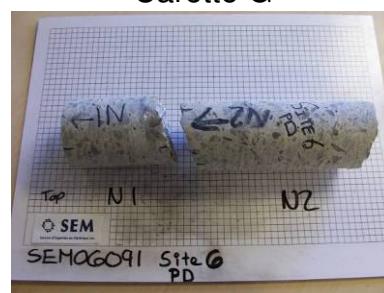


Figure B1-26 – Site 6  
Carotte N-1, N-2

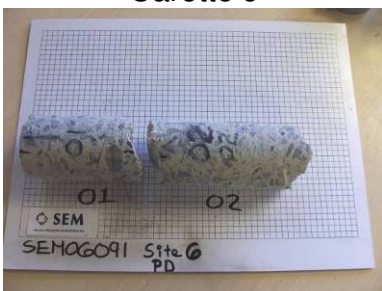


Figure B1-27 – Site 6  
Carotte O-1, O-2



Figure B1-28 – Site 6  
Carotte R