



Faculté de génie  
Département de génie civil

FORMATION DIFFÉRÉE DE L'ETTRINGITE DANS LES BÉTONS  
COULÉS *IN SITU*

Mémoire de maîtrise es sciences appliquées  
Spécialité : génie civil

Michel THIBAUT

Jury : Arezki TAGNIT-HAMOU (directeur)  
Nikola PETROV (co-directeur)  
Loïc DIVET

Sherbrooke (Québec), Canada

Mai 2009

IV-1995



Library and Archives  
Canada

Published Heritage  
Branch

395 Wellington Street  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

Bibliothèque et  
Archives Canada

Direction du  
Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

*Your file* *Votre référence*  
ISBN: 978-0-494-64333-4  
*Our file* *Notre référence*  
ISBN: 978-0-494-64333-4

**NOTICE:**

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

**AVIS:**

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

**Canada**

## Résumé

La présente recherche a pour but de déterminer s'il y a, ou non, un risque de formation différée de l'ettringite, dans des bétons coulés *in situ* au Québec. L'analyse effectuée, sur des échantillons prélevés auprès d'ouvrages construits par la Ville de Montréal, indique que deux ouvrages montrent une formation d'ettringite pouvant être associée à sa formation différée.

En fait, les analyses effectuées démontrent la possibilité d'existence de la formation différée, à mêmes ces structures. Toutefois, il ne s'agit que des parties de l'ouvrage où le risque de développement de la formation différée de l'ettringite est le plus élevé.

Le choix des parties de l'ouvrage à analyser (risques élevé et faible) a permis de démontrer la sensibilité élevée de l'amorce du phénomène, en fonction du dépassement du seuil critique de la température. Il est évident que la formation différée de l'ettringite n'est pas qu'un phénomène généralisé dans tout le corps d'un élément mais qu'il peut être limité localement. Plus particulièrement, dans les parties où les conditions nécessaires ont été réunies, à savoir une température élevée lors de la prise du ciment et du durcissement du béton.

Les essais en laboratoire ont permis de reproduire les conditions thermiques pouvant être rencontrées en chantier, en période estivale, au Québec. Les résultats obtenus incitent à la prudence dans le choix du liant ainsi que de sa teneur, dans les mélanges de bétons, mais aussi des ajouts minéraux et d'adjuvants. Cela permet d'éviter d'atteindre un seuil thermique pouvant augmenter le risque de formation différée de l'ettringite.

Mots clés : béton de masse, ettringite, formation différée de l'ettringite (DEF), bétons coulés *in situ*

## **Remerciements**

*D'abord à ma mère, à qui je dois beaucoup. Je tenais à la remercier sincèrement pour tout.*

*À mon directeur de mémoire, monsieur Arezki Tagnit-Hamou, qui a toujours trouvé les mots pour me motiver dans les moments difficiles. Sincères mercis pour votre patience et votre support indispensable.*

*À mon grand ami Nikola Petrov qui a toujours cru, que non seulement je pouvais, mais aussi que je devais réaliser ce travail. Je lui en serai toujours reconnaissant. Son amitié et sa détermination ont été une formidable source de motivation. Merci de m'avoir guidé et, surtout, de m'avoir supporté dans mes hauts et mes bas, tout au long de ce projet*

*Finalement, merci aux professeurs et à l'équipe technique du groupe de recherche sur le béton de l'Université de Sherbrooke qui ont collaboré de près, comme de loin, à ce projet.*

## TABLE DES MATIÈRES

<b>TABLE DES MATIÈRES</b> .....	i
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	ii
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	iii
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	iii
<b>1 INTRODUCTION</b> .....	1
<b>2 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE</b> .....	3
2.1 Les sulfates dans le béton.....	4
2.1.1 Fabrication du ciment Portland.....	5
2.1.2 Hydratation du ciment Portland – sulfates et l’ettringite.....	8
2.1.3 Béton – sources des sulfates .....	11
<b>3 OBJECTIF</b> .....	13
<b>4 MÉTHODOLOGIE ET PLAN EXPÉRIMENTAL</b> .....	16
4.1 Méthodologie .....	17
4.2 Béton de laboratoire .....	18
4.2.1 Matériaux utilisés .....	19
4.2.2 Confection des échantillons.....	21
4.3 Béton in situ .....	27
4.3.1 Localisation des échantillons.....	29
4.3.2 Traitement et méthode d’analyse des échantillons.....	40
<b>5 PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS</b> .....	42
5.1 Bétons de laboratoire.....	42
5.1.1 Analyse des éléments cubique et les échantillons prismatique «jumeaux» .....	42
5.1.2 Analyse des échantillons prismatique traités thermiquement à 80 °C .....	51
5.2 Bétons in situ.....	53
5.3 Conclusion de chapitre .....	79
<b>6 CONCLUSION</b> .....	81
<b>RÉFÉRENCES</b> .....	84
<b>ANNEXES</b> .....	88
Localisation des échantillons in situ.....	89
Analyse des échantillons des bétons in situ .....	103

## LISTE DES TABLEAUX

<b>TABLEAU 4.1</b>	COMPOSITION DES CIMENTS UTILISÉS .....	19
<b>TABLEAU 4.2</b>	COMPOSITION DES BÉTONS DES CUBES .....	21
<b>TABLEAU 4.3</b>	COMPOSITION DES BÉTONS DES PRISMES .....	25
<b>TABLEAU 4.4</b>	ÉCHANTILLONS <i>IN SITU</i> .....	29
<b>TABLEAU 5.1</b>	TEMPÉRATURES DES BÉTONS UTILISÉS .....	42

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 2.1</b> Domaine des compositions chimiques des principaux composants des liants hydrauliques..	6
<b>Figure 2.2</b> Schéma de fabrication du ciment et du béton.....	9
<b>Figure 3.1</b> Schéma des couches du gypse et de l'ettringite causées par une attaque sulfatique externe. .....	14
<b>Figure 4.1</b> Évolution de la température d'hydratation d'un élément massif.....	17
<b>Figure 4.2</b> Cubes de 600 mm x 600 mm x 600 mm de côté dans de l'eau saturée en chaux.....	24
<b>Figure 4.3</b> Présentation schématique du traitement thermique.....	25
<b>Figure 4.4</b> Présentation schématique du cycle thermique.....	26
<b>Figure 4.5</b> Carte de localisation des structures .....	28
<b>Figure 4.6</b> Pont du cosmos.....	29
<b>Figure 4.7</b> Mur de culé du pont du Cosmos.....	30
<b>Figure 4.8</b> Pont des Îles .....	31
<b>Figure 4.9</b> Culé nord du pont des Îles.....	31
<b>Figure 4.9</b> Culé nord du pont des Îles.....	32
<b>Figure 4.11</b> Passage supérieur Rosemont/Van-Horne .....	32
<b>Figure 4.12</b> Pilier échantillonné.....	33
<b>Figure 4.13</b> Surface bouchardée .....	33
<b>Figure 4.14</b> Passage inférieur Cavendish.....	34
<b>Figure 4.15</b> Mur de culé ouest .....	34
<b>Figure 4.16</b> Fissures mur de culé ouest .....	35
<b>Figure 4.17</b> Passage inférieur Jarry/Querbes (après réparation).....	35
<b>Figure 4.18</b> Mur de soutènement .....	36
<b>Figure 4.19</b> Passage inférieur Masson (après réparation).....	36
<b>Figure 4.20</b> Efflorescence mur de culé .....	37
<b>Figure 4.21</b> Fissures mur de culé.....	37
<b>Figure 4.22</b> Passage inférieur Victoria .....	38
<b>Figure 4.23</b> Fissuration culé ouest .....	39
<b>Figure 4.24</b> Fissures culé ouest.....	39
<b>Figure 5.1</b> Évolution de la température des cubes .....	43
<b>Figure 5.2</b> Évolution de la température des prismes.....	44

<b>Figure 5.3</b> Expansion des cubes (mélanges M6 et M7).....	45
<b>Figure 5.3A</b> Expansion du cube No 5.....	46
<b>Figure 5.4</b> Expansion des prismes (mélanges M6 et M7).....	47
<b>Figure 5.5</b> Expansion des cubes (mélanges M8 et M9).....	48
<b>Figure 5.6</b> Expansion des prismes (mélanges M8 et M9).....	49
<b>Figure 5.7</b> Expansion de cube (mélange M10).....	50
<b>Figure 5.8</b> Expansion des prismes (mélange M10).....	51
<b>Figure 5.9</b> Expansion des prismes des mélanges sans air entraîné.....	52
<b>Figure 5.10</b> Expansion des prismes des mélanges avec air entraîné.....	53
<b>Figure 5.11</b> Micrographe 1.....	54
<b>Figure 5.12</b> Analyse élémentaire 1.....	55
<b>Figure 5.13</b> Micrographe 2.....	55
<b>Figure 5.14</b> Analyse élémentaire 2.....	55
<b>Figure 5.15</b> Micrographe 3.....	56
<b>Figure 5.16</b> Micrographe 4.....	57
<b>Figure 5.17</b> Analyse élémentaire 3.....	57
<b>Figure 5.18</b> Micrographe 5.....	57
<b>Figure 5.19</b> Analyse élémentaire 4.....	58
<b>Figure 5.20</b> Micrographe 6.....	59
<b>Figure 5.21</b> Analyse élémentaire 5.....	59
<b>Figure 5.22</b> Micrographe 7.....	59
<b>Figure 5.23</b> Micrographe 8.....	60
<b>Figure 5.24</b> Micrographe 9.....	60
<b>Figure 5.25</b> Analyse élémentaire 6.....	61
<b>Figure 5.26</b> Micrographe 10.....	61
<b>Figure 5.27</b> Analyse élémentaire 7.....	61
<b>Figure 5.28</b> Micrographe 11.....	62
<b>Figure 5.29</b> Analyse élémentaire 8.....	63
<b>Figure 5.30</b> Micrographe 12.....	63
<b>Figure 5.31</b> Micrographe 13.....	63
<b>Figure 5.32</b> Micrographe 14.....	64
<b>Figure 5.33</b> Micrographe 15.....	64
<b>Figure 5.34</b> Micrographe 16.....	64
<b>Figure 5.35</b> Micrographe 17.....	65



<b>Figure 5.36</b> Micrographe 18 .....	66
<b>Figure 5.37</b> Micrographe 19 .....	66
<b>Figure 5.38</b> Micrographe 20 .....	66
<b>Figure 5.39</b> Micrographe 21 .....	67
<b>Figure 5.40</b> Micrographe 22 .....	67
<b>Figure 5.41</b> Micrographe 23 .....	67
<b>Figure 5.42</b> Micrographe 24 .....	68
<b>Figure 5.43</b> Micrographe 25 .....	68
<b>Figure 5.44</b> Analyse élémentaire 9 .....	68
<b>Figure 5.45</b> Micrographe 26 .....	70
<b>Figure 5.46</b> Micrographe 27 .....	70
<b>Figure 5.47</b> Micrographe 28 .....	70
<b>Figure 5.48</b> Micrographe 29 .....	71
<b>Figure 5.49</b> Micrographe 30 .....	71
<b>Figure 5.50</b> Micrographe 31 .....	71
<b>Figure 5.51</b> Analyse élémentaire 10 .....	72
<b>Figure 5.52</b> Analyse élémentaire 11 .....	72
<b>Figure 5.53</b> Micrographe 32 .....	72
<b>Figure 5.54</b> Micrographe 33 .....	73
<b>Figure 5.55</b> Micrographe 34 .....	73
<b>Figure 5.56</b> Analyse élémentaire 12 .....	73
<b>Figure 5.57</b> Micrographe 35 .....	75
<b>Figure 5.58</b> Analyse élémentaire 13 .....	75
<b>Figure 5.59</b> Micrographe 36 .....	75
<b>Figure 5.60</b> Micrographe 37 .....	76
<b>Figure 5.61</b> Micrographe 38 .....	76
<b>Figure 5.62</b> Micrographe 39 .....	76
<b>Figure 5.63</b> Micrographe 40 .....	77
<b>Figure 5.64</b> Analyse élémentaire 14 .....	77
<b>Figure 5.65</b> Micrographe 41 .....	78
<b>Figure 5.66</b> Micrographe 42 .....	78

## 1 INTRODUCTION

La durabilité d'un béton est une réponse aux charges en service et aux conditions environnementales. Ainsi la durabilité d'un béton dépend d'une multitude de caractéristiques du matériau, mais aussi de l'agressivité de son environnement. Divers phénomènes de détérioration peuvent affecter la durabilité du béton. Le phénomène d'attaque par les sulfates demeure encore aujourd'hui un sujet de recherche important.

La formation différée de l'ettringite est une attaque par les sulfates contenus dans la matrice de la pâte de ciment hydratée d'un béton durci. Le résultat de cette attaque entraîne des contraintes de traction supérieures à la résistance en tension du béton durci, suffisantes pour provoquer la fissuration des éléments. Ces contraintes sont le résultat de la formation de micro cristaux (nucléation) d'ettringite [TAYLOR, 1993b ; Johansen, V. et Thaulow, N., 1999] et également, selon certains chercheurs, la conséquence de la croissance cristalline [ODLER, I. et GASSER, M., 1988 ; DIAMOND, S., 1996].

Existe-t-il un potentiel ou un risque réel d'expansion des bétons causée par la formation différée de l'ettringite dans le béton coulé *in situ* des ouvrages d'art au Québec? Un tel phénomène pourrait être une des sources de désordre causant la fissuration ou, même simplement, une amorce de fissuration, ouvrant ainsi la voie aux divers autres mécanismes de détérioration du béton.

Actuellement, les chercheurs ne sont pas unanimes sur l'existence d'un tel phénomène dans les éléments de béton coulé sur place, sous une cure thermique accélérée [KURDOWSKI, W., 2002 ; THOMAS, M.D.A., 2000]. En fait, les chercheurs semblent unanimes que ce phénomène existe dans le cas d'éléments où la chaleur dégagée, lors de la prise et du durcissement du béton, cause une température dont le maximum dépasse un certain seuil critique se situant, d'après les normes en vigueur (Normes CAN A23.4, German Committee for Reinforced Concrete 1989 et le European Committee for Standardization), entre 60 et 70 °C, selon la classe de l'exposition. Lorsque ce seuil est atteint ou dépassé, ceci constitue une source de rejet pour un élément préfabriqué, ce qui n'est pas nécessairement le cas d'éléments coulés en chantier. La norme CAN A23.1, norme de référence pour les bétons coulés en chantier, ne donne aucune restriction à cet égard.

Puisque les températures élevées fréquentes, prévalant à Montréal ou dans le sud du Québec durant la période estivale, sont propices à engendrer, pour des éléments massifs, le dépassement du seuil à risque, l'étude entreprise devrait permettre de déterminer le potentiel de formation différée de l'ettringite dans les bétons coulés sur les chantiers et, le cas échéant, l'expansion qui pourrait en découler.

La partie de l'étude portant sur les bétons expérimentaux en laboratoire simule les températures atteintes des bétons *in situ*, dans des éléments de grandes dimensions ou coulés par temps chaud. La température de bétons de laboratoire, lors de la prise et le durcissement, a régulièrement été au-dessus de 55 °C et, même dans un cas, au-dessus de 70 °C.

## 2 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Les recherches intensives sur les désordres que peuvent provoquer l'instabilité de l'ettringite et engendrer, par la suite, sa formation différée ont commencé il y a une quarantaine d'années. Elles ont débuté après la découverte de fissures en nombre important sur des dormants de chemin de fer en béton, aux États-Unis et au Canada. Des milliers de dormants en béton préfabriqué ont d'ailleurs été installés sur des réseaux ferroviaires en Amérique du Nord et, au bout de quelques années, se sont fissurés. Les recherches des causes de cette fissuration ont dès lors commencées [GUINIER, A. et REGOURD, M., 1968 ; HANSON, J.A., 1965 ; LERCH, W., 1945 ; MEHTA, P.K. et KLEIN, A., 1966 ; MEHTA, P.K., 1973]. La conclusion de ces recherches tend à démontrer que la formation différée de l'ettringite et la réaction alcalis-granulats étaient les causes de la dégradation [MORANVILLE, M., 1995 ; SCRIVENER, K.L., 1996].

Les recherches se sont également poursuivies ailleurs dans le monde et des cas similaires ont été rapportés en Allemagne et en Australie [HOBBS, D.W., 1999 ; SHAYAN, A. et IVANUSEC, I., 1996]. On y constate que, tout comme pour les dormants fissurés, tous les éléments dégradés par la formation différée de l'ettringite étaient des éléments préfabriqués [LAWRENCE, B.L. et coll., 1999]. Dans chacun des cas, lors de la fabrication, une cure accélérée à une température élevée a été utilisée afin d'augmenter la capacité ou le rythme de production des usines de préfabrication. Les températures de cure utilisées étaient de 80 à 90 °C. De même, d'autres cas ont par la suite été rapportés dans la littérature, mais toujours pour des éléments préfabriqués [MARUSIN, S.L. et HIME, W.G., 1997] ou ayant subi une cure accélérée à des températures élevées.

Après ces investigations, des recherches intensives en laboratoire ont commencé et, partout dans le monde, les chercheurs ont commencé à voir et à comprendre les causes et les mécanismes de la formation différée de l'ettringite. Ainsi il a été rapporté que le facteur primordial pour causer la formation différée de l'ettringite était une température élevée lors de la prise et du durcissement de la matrice [HIME, W.G. et MARUSIN, S.L., 1999 ; LAWRENCE, B.L. et coll., 1999 ; FAMY, C., 1999]. Ceci a pour effet d'empêcher la formation de l'ettringite primaire.

Diverses théories sur les conditions menant à la formation différée de l'ettringite ont été rapportées dans la littérature. Mehta (1994) et Collepardi (1999) ont une approche holistique dont les conditions nécessaires pour la formation différée de l'ettringite sont la microfissuration, une source d'eau externe ou une humidité très élevée en service ainsi qu'une source interne de sulfates. Cette approche exige donc une préexistence de microfissuration, comme les travaux de Fu et coll. (1994) et Fu et Beaudoin (1996) le mentionnent, et sous-entend que l'ettringite elle-même ne peut pas causer de fissuration. Petrov (2004) a, quant à lui, démontré qu'une formation différée de l'ettringite pouvait se produire dans des éléments ne comportant aucune pré-fissuration. Il semble bien que l'apport d'eau nécessaire à la transformation des monosulfoaluminates en ettringite puisse se faire par diffusion de l'eau dans la matrice.

Beaucoup de travaux ont porté sur les mortiers, également chauffés en laboratoire [DIAMOND, S. et ONG, S., 1992 ; KELHAM, S., 1999 ; KJELLEN, K.O., 1992]. Cependant, très peu de recherches sur les bétons de laboratoire [HOBBS, D.W., 1999 ; LAWRENCE, C.D., 1995 ; AKMAN, M.S. et GÜLSEREN, H., 1994 ; DAY, R.L., 1992 ; HEINZ, D. et coll., 1999] et, encore moins, sur les bétons coulés *in situ* [DIVET, L., 2001 ; LAWRENCE, B.L. et coll. 1999 ; SCRIVENER, K.L., 1996] ont été faites. Dans la littérature, de rares cas prouvent que la formation différée de l'ettringite est possible dans les cas où le béton n'a pas été traité thermiquement durant la prise. Les travaux de Johansen, V. et Thaulow, N. (1999), Divet (1998, 2001) et Petrov et coll. (2006) montrent bien le potentiel réel d'une telle formation.

## **2.1 Les sulfates dans le béton**

Qu'est-ce que la formation différée de l'ettringite? Constitue-t-elle un risque de désordre dans les ouvrages en béton existant? Aborder ces sujets, sans au préalable connaître ce que sont exactement l'ettringite et sa formation différée, ne permettrait pas de bien saisir les enjeux.

L'ettringite est le produit d'hydratation du ciment qui se forme en combinant l'eau de gâchage, les sulfates et les aluminates du ciment. Le rôle principal de l'ettringite est d'assurer la maniabilité du béton pour permettre suffisamment de temps pour le transporter et le placer,

là où requis. C'est pourquoi, lors de la production du ciment, est ajouté au clinker des sulfates de calcium (gypse, hémihydrate et anhydrite).

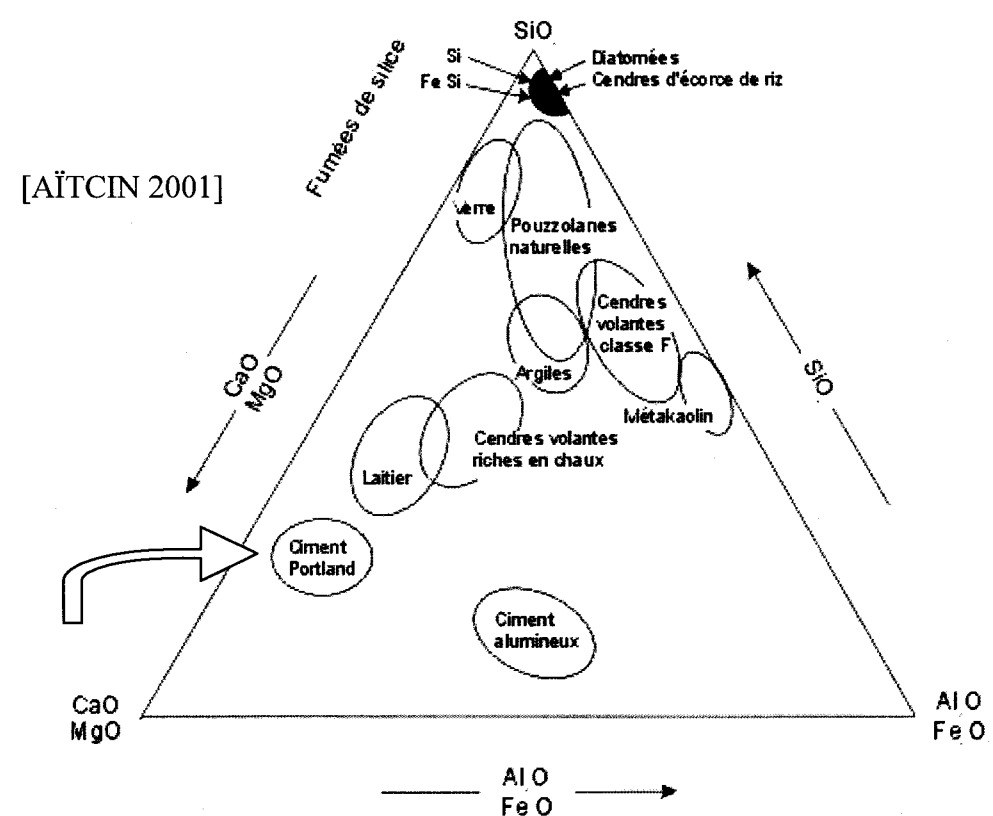
#### 2.1.1 Fabrication du ciment Portland

On produit le ciment Portland à partir de diverses matières premières : du calcaire, de l'argile, et du sable siliceux. On emploie le calcaire, matière prédominante dans le mélange, pour fournir le calcium. L'utilisation de l'argile permet de fournir les aluminates, tandis que le sable siliceux fournit la silice nécessaire. Du fer est aussi employé pour la fabrication du ciment. Une fois les matières premières bien dosées, le mélange est finement broyé et homogénéisé. Lorsque la composition chimique du cru, nécessaire à la fabrication du ciment Portland obtenu présente la composition chimique du diagramme, de la figure 2.1 ce dernier est alors prêt pour la cuisson. Préalablement à cette dernière, le cru sera traité ou préchauffé suivant divers procédés de fabrication. Le processus de fabrication des ciments peut, en effet, comporter ou non des précalcinateurs.

Après avoir soigneusement dosé, homogénéisé et finement broyé le cru, on l'introduit dans le four où il est chauffé jusqu'à une température de 1450 °C. Durant la cuisson, des réactions chimiques se produisent dans le four.

Le cru à l'entrée du four, après décarbonatation complète, a généralement la composition chimique suivante : 60 à 67 % de CaO; 17 à 25 % de SiO<sub>2</sub>; 3 à 8 % de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> et 0,5 à 6 % de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ainsi qu'un faible pourcentage d'éléments mineurs. La chaux obtenue de la décarbonatation du calcaire se combine avec la silice pour former la phase béliitique (C2S) qui, par la suite et à son tour, continue de se combiner avec la chaux (CaO) pour former la phase alitique (C3S). L'alumine et le fer contribuent, à titre de fondants, à diminuer la température de cuisson du clinker, pour en faciliter la production. Dans le four, l'alumine et le fer deviennent plus liquides à température élevée que les phases alitique et béliitique, formant la phase interstitielle. Le rapport entre l'alumine et le fer détermine la viscosité de la phase interstitielle et, indirectement, la vitesse de progression du cru dans le four ou, autrement dit, l'efficacité de production du four. Dans le cas où la quantité de fer ne serait suffisante dans la matière première, on procède alors à l'ajout au cru des résidus de fer ou, encore, de minerais

de fer pour s'assurer d'obtenir une composition du cru, tel que définie dans le diagramme de phase présenté à la figure 2.1.



**Figure 2.1** Domaine des compositions chimiques des principaux composants des liants hydrauliques

Le produit qui sort du four se nomme le clinker. À la sortie du four, une lave chaude d'une température de l'ordre de 1450 °C est refroidie brusquement par un courant d'air froid, à l'aide de puissants refroidisseurs. Cette trempe fige la forme cristalline obtenue dans le four, tout en conservant son potentiel énergétique dans les cristaux formés, nécessaire aux réactions d'hydratation.

Le clinker est composé de quatre phases principales et d'éléments mineurs. Les phases principales sont l'alite (C3S ou  $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ), la bélite (C2S ou  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ), le C3A ou  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  et le C4AF ou  $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ . En plus des phases principales, les éléments mineurs portent ce nom en raison de la faible quantité qu'ils représentent dans le clinker, mais

ils peuvent tout de même avoir une grande influence sur les propriétés du ciment. Les éléments mineurs les plus importants d'un clinker industriel sont les éléments suivants : Mg, Ti, Mn, S, K et Na.

Parmi les éléments mineurs qui entrent dans la composition du ciment, dans le cadre de la présente étude, sont les alcalis (K et Na). L'anhydrite sulfurique ( $\text{SO}_3$ ), que l'on trouve dans le clinker, provient soit de la matière première, soit des combustibles. La teneur en anhydrite sulfurique ( $\text{SO}_3$ ) dans le ciment est limitée à 2,3 % pour les ciments résistants aux sulfates (contenant moins que 5 % de  $\text{C}_3\text{A}$ ), à 3,5 % pour le ciment à utilisation générale (GU) et, finalement, à 4,5 % pour le ciment à résistance initiale élevée (HE) qui contient plus que 8 % de  $\text{C}_3\text{A}$  [ASTM C150 ; CAN/CSA-A3000-03].

Les propriétés du clinker, obtenu à la sortie du four, dépendent de la composition du cru et des gaz provenant du combustible, du temps de séjour du cru dans le four et de la façon dont il est refroidi.

Dans le four, les alcalis entrent en contact avec les poussières et les gaz présents, habituellement riches en soufre, où ils se combinent pour former des sulfates alcalins, soit : l'arcanite ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ), l'aphtitalite ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 3\text{K}_2\text{SO}_4$ ) et le calcium langbeinite  $2\text{CaSO}_4 \cdot \text{K}_2\text{SO}_4$  [AMAFUJI et TSUMAGARI, 1969 ; POLLITT et BROWN, 1969]. Après la combinaison totale des alcalis et du  $\text{SO}_3$ , l'excès d'alcalis ou de  $\text{SO}_3$  entre dans la composition des phases principales du clinker.

On a soupçonné les sulfates contenus dans le clinker d'être des sources potentielles suffisantes pour causer une formation différée de l'ettringite, même dans les bétons non chauffés [MIELENZ et coll. ; 1995, HIME et MARUSIN, 1999 ; KURDOWSKI, 2002 ; HIME, W.G., 1996 ; GRATTAN-BELLEW, P.E. et coll., 1998]. Cependant, aucune étude en laboratoire n'a confirmé cette hypothèse. Bien au contraire, Kahlem (1996) a démontré que la teneur en sulfates du clinker, dans les limites des clinkers commerciaux, n'a pas d'influence sur l'expansion causée par la formation différée de l'ettringite.

On ajoute au clinker des sulfates de calcium et on broie, très finement le tout, pour obtenir le ciment Portland. « Le ciment Portland est une poudre de couleur grise pâle, aussi fine qu'elle



« passe au travers un tamis de 45 microns sur lequel même l'eau est retenue » [AITCIN, 2001]. Quoique simple en apparence, le processus nécessaire à la fabrication d'un bon ciment Portland comporte plusieurs étapes et nécessite un contrôle constant des matières entrant dans la fabrication pour assurer la composition chimique précise du produit. Les caractéristiques d'un ciment ou les propriétés de ces composantes dépendent également de nombreux autres facteurs tels que la température à l'intérieur du four, l'inclinaison et la vitesse de rotation de ce dernier, la position de la flamme, le temps de séjour sous une température donnée, etc.

#### 2.1.2 Hydratation du ciment Portland – sulfates et l'ettringite

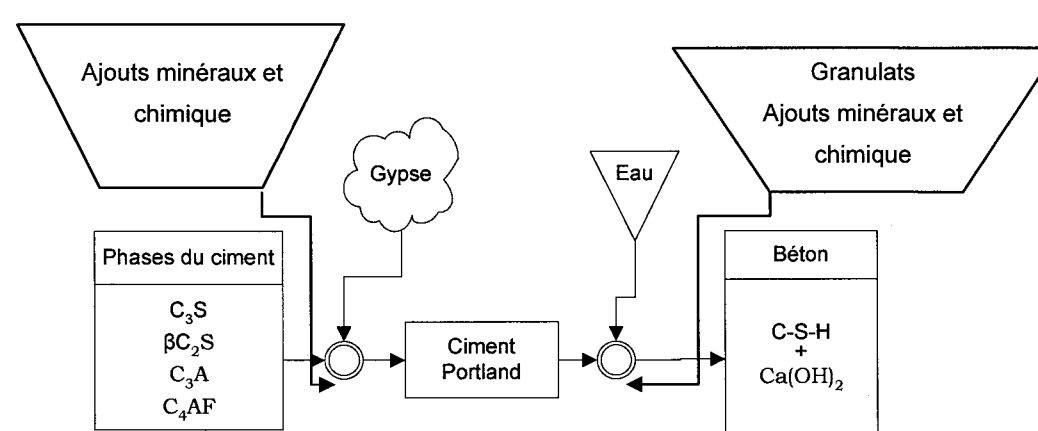
Dans la solution créée par l'ajout de l'eau de gâchage au mélange de béton, on trouve diverses formes de sulfates de calcium (gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), hémihydrate ( $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2}\text{H}_2\text{O}$ ) ou anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ )) et des sulfates alcalins provenant du ciment. La vitesse de dissolution et la solubilité de ces derniers sont considérablement plus élevées que celles des différentes formes de sulfates de calcium. Toutefois, ce serait le cas que pour une très courte période de temps seulement, soit environ de 20 à 30 secondes [MICHAUD et SUDERMAN, 1999].

Les sulfates alcalins sont la source des ions alcalins  $\text{K}^+$  et  $\text{Na}^+$  et des ions  $\text{SO}_4^{2-}$ . Il a été rapporté qu'avec une augmentation de l'alcalinité de la solution, la solubilité de l'ettringite augmentait [GHORAB et coll. 1980 ; GHORAB, 1999] ainsi que la quantité des ions  $\text{SO}_4^{2-}$  absorbés dans les C-S-H lors d'un traitement thermique [DIVET, 2001 ; DIVET et RANDRIAMBOLOLONA, 1998].

L'effet combiné d'une augmentation de l'alcalinité et de la température conduit à une solubilité plus élevée de l'ettringite et, le cas échéant, à sa décomposition (instabilité). L'augmentation de la teneur en alcalis, combinée à celle de la température, peut cependant causer la réaction alcalis-granulats. Pour cette raison, cette réaction et la formation de l'ettringite différée sont souvent observées simultanément dans les éléments préfabriqués endommagés [JONES, T.N. et POOLE, A.B., 1987 ; SHAYAN, A. et coll., 1993 ; SHAYAN, A. et IVANUSEC, I., 1996 ; DIAMOND, S. et coll., 1994].

L'hydratation du ciment débute dès que l'on ajoute de l'eau au ciment Portland. Pendant ce processus, les phases silicates du ciment, C3S et C2S produisent des silicates de calcium

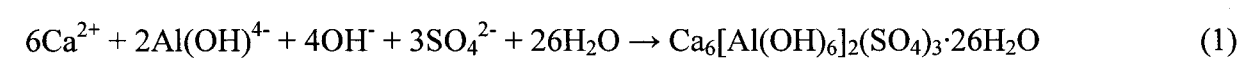
hydratés qui sont généralement représentés par le symbole C-S-H et de la portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) [NEVILLE, 1998].



**Figure 2.2** Schéma de fabrication du ciment et du béton

Si l'on ajoute de l'eau au clinker broyé en une poudre fine il se produira une hydratation prompte ou prise éclair. En effet, les aluminates ( $\text{C}_3\text{A}$ ) réagiront très rapidement avec l'eau pour former des aluminates hydratés ou hydrogrenats ( $\text{C}_4\text{AH}_13$ ) qui rigidifient la matrice. En même que l'on ait complété le malaxage. Pour éviter une telle réaction et permettre le malaxage, le transport au chantier, de même que la mise en place du béton, des sulfates de calcium sont ajoutés au clinker lors du broyage de celui-ci.

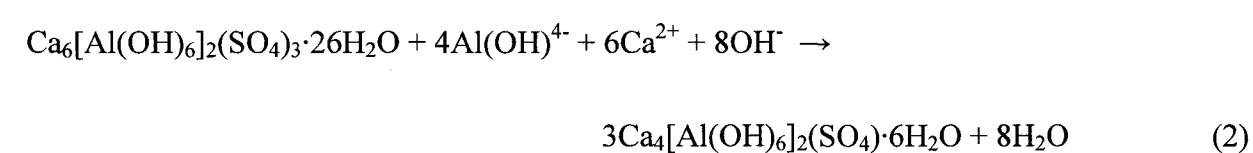
Le gypse et le  $\text{C}_3\text{A}$  réagiront pour former du sulfoaluminate de calcium ou de l'ettringite, selon l'équation chimique suivante :



Lors de l'hydratation, les sulfates se dissoudront rapidement dans l'eau. La mise en solution, au premier contact de l'eau des sulfates de calcium et alcalins, donnera une solution aqueuse saturée d'ions sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). Cette solution, une fois en contact avec les cristaux de  $\text{C}_3\text{A}$ , produira de l'ettringite et empêchera la formation des hydrogrenats. Dès lors, débute ce que l'on appelle, la période dormante, c'est-à-dire la période pendant laquelle la prise est mise en veille et que le béton demeure maniable. Durant cette période dormante, la formation de l'ettringite se poursuivra puisque que la dissolution des aluminates, quoique très ralentie, se

fera de même. Les aluminates disponibles dans la solution saturée d'ions  $\text{SO}_4^{2-}$  formeront de l'ettringite qui, dans la matrice de béton, a suffisamment d'espace pour la formation des cristaux et leur croissance.

Tant que la solution aqueuse demeure saturée d'ions  $\text{SO}_4^{2-}$ , c'est l'ettringite qui se forme, Tant qu'il y aura des sources de sulfates, c'est-à-dire des sulfates de calcium, la solution aqueuse demeurera sursaturée d'ions  $\text{SO}_4^{2-}$ . Cependant, les sulfates de calcium finiront par se dissoudre complètement et il n'y aura plus de nouvelle source de sulfates. La concentration de la solution s'appauvrira en ions  $\text{SO}_4^{2-}$  et, à ce moment, l'ettringite deviendra instable. Cette instabilité provoquera la décomposition de l'ettringite en monosulfoaluminates, selon la réaction suivante :



Les sources de sulfates, nécessaires à la formation des monosulfoaluminates, proviennent de l'ettringite elle-même et du reste des ions de sulfate de calcium présents dans la solution aqueuse. La quantité de ces sulfates de calcium continuera à décroître jusqu'à ce qu'il n'en reste plus assez pour maintenir la solution sursaturée.

Lors de l'hydratation d'un ciment Portland, à température ambiante, l'épuisement des sulfates de calcium peut prendre environ de 24 heures, jusqu'à deux ou trois jours. Cependant, ce processus peut être accéléré par une hausse de la température.

Un autre phénomène, soit l'instabilité de l'ettringite ou l'empêchement même de sa formation, peut se produire si la température du béton durcissant atteint un seuil critique. La chaleur d'hydratation peut en effet être suffisamment importante, de même que les conditions environnementales, pour augmenter la température du béton en processus d'hydratation à un niveau où l'ettringite deviendra instable. L'ettringite déjà formée à ce moment se décomposera donc, tandis que la nouvelle ettringite ne pourra se former. Ce phénomène ressemble à la décomposition de l'ettringite lorsque la solution aqueuse initiale n'est plus saturée d'ions  $\text{SO}_4^{2-}$ . Le tout, sous réserve que la plupart des ions  $\text{SO}_4^{2-}$  resteront dans la

solution aqueuse, puisque le seuil de sursaturation, à une température élevée, est plus grande et ils pourront être capturés (adsorbés) dans les C-S-H [MORANVILLE, 1995]. Il a également été montré que cette adsorption des ions  $\text{SO}_4^{2-}$  dans les C-S-H est réversible [DIVET, L. et RANDRIAMBOLOLONA, R., 1998]. Ainsi ils seront adsorbés mais, dans le temps, ils pourront également être relâchés des C-S-H et devenir à nouveau disponibles pour la formation d'ettringite. Lorsque cela se produit, l'on dit qu'il y a formation différée d'ettringite.

La température du seuil critique ne fait pas encore l'unanimité dans la littérature, mais il est certain qu'il n'est pas le même pour toutes les matrices cimentaires (type de ciment, rapport eau/ciment, présence des ajouts minéraux, présences des adjuvants chimiques, etc.). Peu importe la température du seuil, il est plus important de souligner que l'ettringite déjà formée se décomposera et formera du monosulfoaluminate, tandis que la formation de nouvelle ettringite sera empêchée.

Les principales caractéristiques des ciments pouvant affecter la formation différée de l'ettringite, en plus de la chaleur d'hydratation, la finesse (Blaine) et le rapport  $\text{SO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ , sont les teneurs en  $\text{SO}_3$ , C3A, C3S et alcalis. Par contre, l'effet de ces facteurs sur la formation différée de l'ettringite ne peut être déterminé de façon simple car ils dépendent les uns des autres. Par exemple, la sursaturation de la solution en ions  $\text{SO}_4^{2-}$  est nécessaire pour que l'ettringite se forme et demeure stable, mais cette sursaturation dépend également des concentrations des autres ions dans la solution, de la température et de la pression.

### 2.1.3 Béton – sources des sulfates

Le béton est un matériau fabriqué à partir de granulats (sable et gros granulats), de ciment Portland et d'eau. Dans les bétons modernes, de nombreux autres constituants entrent dans sa composition comme les ajouts minéraux, les adjuvants chimiques, les colorants, les fibres synthétiques ou métalliques. Tous les composants d'un béton peuvent emmener, dans ce dernier, des sulfates sous diverses formes. Il est donc très important de bien contrôler la teneur en sulfates de tous les composants. L'eau de gâchage peut contenir des sulfates, par exemple l'eau provenant du lavage des bétonnières ; les granulats peuvent être contaminés (contenir)

du gypse, de la pyrrhotite ou d'autres minéraux sulfatiques. Certains adjuvants, notamment les supers plastifiants ou les réducteurs d'eau à base de lignosulfonates, contiennent des sulfates.

La formation différée de l'ettringite, dans la matrice rigide et dense du béton, provoquera une expansion. L'ettringite qui se forme occupe plus de volume que les composants desquels elle s'est formée [TAYLOR, H.F.W., 1993] et, par conséquent, il se produit une expansion. Celle-ci, à l'intérieur du béton, peut provoquer la fissuration de la matrice cimentaire. La formation des microcristaux, ou la nucléation de l'ettringite, pourrait être empêchée si la matrice était en mesure d'exercer une pression de confinement supérieure à 350 MPa [MATHER, B., 2000 ; MEHTA, P.K. et KLEIN, A., 1966], pression au-delà de laquelle, l'ettringite ne se forme plus. Cette pression est de beaucoup supérieure à la résistance en traction du béton. En fait, il n'y a pas de béton qui peut résister à une telle pression.

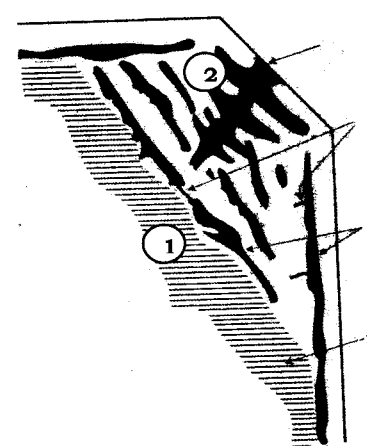
Les facteurs qui affectent la formation différée de l'ettringite et l'expansion qui s'en suit sont la température développée, la durée pendant laquelle le béton est chauffé à une température élevée (peu importe la source de la chaleur), la présence d'air entraîné, le rapport eau/ciment (eau/liant), la teneur, le type de ciment/liant utilisé, etc. L'expansion est également fonction de la porosité (perméabilité) ou accessibilité à l'eau et du volume total de vide, y compris l'air entraîné [PETROV, 2004].

### 3 OBJECTIF

La présente étude se concentre sur le mécanisme de détérioration du béton par l'attaque sulfatique appelée la formation différée de l'ettringite. Plus précisément, l'intérêt de cette étude porte sur la question à savoir si la formation différée de l'ettringite, et l'expansion qui s'en suit, peut avoir lieu dans des bétons coulés en chantier. L'étude cherche donc à déterminer le potentiel de formation différée de l'ettringite dans les bétons fréquemment utilisés pour la construction des sections plus massives des ouvrages d'art.

Il est important de clarifier qu'il faut d'abord bien distinguer le mécanisme d'attaque sulfatique externe de l'attaque sulfatique interne. La formation différée de l'ettringite est une forme d'attaque sulfatique interne. Par contre, d'autres formes d'attaque sulfatique externe existent également.

L'eau provenant de l'extérieur et qui pénètre à travers le système des pores et des capillaires, même dans un béton non fissuré, peut entraîner une diminution de son pH. Cette même eau peut également apporter des ions sulfates. Chaque enrichissement en sulfates, à l'intérieur de la pâte hydratée, (figure 3.1) cause aisément la transformation des aluminates hydratés en ettringite (1). Dans le cas d'une concentration élevée en sulfates ou d'un manque d'aluminate, la portlandite se transformera en gypse (2). Dans le cas de l'apport des sulfates provenant de l'extérieur, il s'agit clairement d'une attaque externe.



**Figure 3.1** Schéma des couches du gypse et de l'ettringite causées par une attaque sulfatique externe. [GOLLOP, R.S. et TAYLOR, H.F.W., 1999]

La durabilité du béton peut également être affectée, non seulement par son environnement, mais aussi par les caractéristiques du matériau tel que la perméabilité, la teneur en ciment, la composition chimique et minéralogique, la nature des hydrates formés lors de l'hydratation du ciment, les caractéristiques des granulats, etc. Un béton mal conçu peut également être le résultat d'une contamination par un excès de sulfates lorsque les granulats sont contaminés ou lorsque l'eau de gâchage est sulfatée. Dans le cas d'une contamination des granulats ou de l'eau de gâchage, les ions  $SO_4^{2-}$ , qui participeront à la formation de l'ettringite dans la matrice durcie ensuite, se trouvent dans le béton dès sa confection. Ces ions seront relâchés (désorbés) et ils se retrouveront dans la solution interstitielle. Comme les sulfates se retrouvent à l'intérieur des bétons dès sa confection, il s'agit d'une attaque interne. Cependant, le cas de contamination des composants du béton, par un excès de sulfates, n'est pas considéré, dans la présente étude, comme étant une formation différée de l'ettringite. Or, comme mentionné précédemment dans le cas de l'attaque externe, chaque enrichissement en sulfates, à l'intérieur de la pâte hydratée, cause aisément la transformation des aluminates hydratés en ettringite et, par conséquent, le gonflement, la fissuration et l'éclatement du béton.

Lors de l'hydratation, sous des conditions particulières de température élevée, les ions  $\text{SO}_4^{2-}$  provenant des sulfates de calcium, dont le rôle est la régularisation de la prise du C3A, peuvent être adsorbés sur les C-S-H [DIVET et RANDRIAMBOLOLONA, 1998]. La température élevée, lors de l'hydratation, peut changer la cinétique de cette dernière, causer l'instabilité et la décomposition (transformation en monosulfoaluminate) de l'ettringite primaire déjà formée et empêcher la formation de nouvelle ettringite. Les ions  $\text{SO}_4^{2-}$  seront adsorbés dans les C-S-H et une partie d'entre eux peut demeurer en solution. Les ions  $\text{SO}_4^{2-}$  adsorbés sur les C-S-H, ainsi que les regroupements  $\text{SO}_3$  se retrouvant dans la composition du monosulfoaluminate, présentent une source potentielle de sulfates pour une formation différée de l'ettringite [MORANVILLE, 1995].

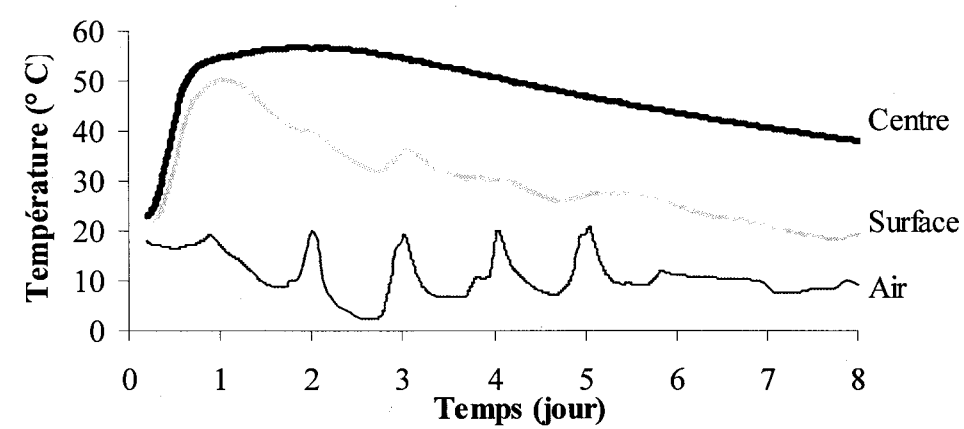
L'objectif de la présente étude est donc de vérifier le potentiel de détérioration des bétons coulés sur place, par le mécanisme de la formation différée de l'ettringite. Afin d'atteindre l'objectif posé, un plan expérimental a été établi et présenté au chapitre suivant.



#### 4 MÉTHODOLOGIE ET PLAN EXPÉRIMENTAL

Les expériences entreprises n'ont pas été limitées qu'à de nouveaux mélanges de béton préparés en laboratoire. Des échantillons ont aussi été prélevés sur des éléments des structures existantes et construites à Montréal, il y a plus de 40 ans. La dégradation prématurée des bétons, due à la formation différée de l'ettringite, a été le sujet de nombreuses recherches au cours des dernières années. La littérature scientifique est riche en publications et en résultats expérimentaux, surtout sur des échantillons de pâte (ciment et eau) ou de mortier (ciment, sable et eau) [DIAMOND, S. et ONG, S., 1992 ; KELHAM, S., 1999 ; KJELLSSEN, K.O., 1992 ; HOBBS, D.W., 1999 ; LAWRENCE, C.D., 1995 ; AKMAN, M.S. et GÜLSEREN, H., 1994 ; DAY, R.L., 1992 ; HEINZ, D. et coll., 1999], mais relativement peu de résultats sur le béton lui-même sont disponibles [DIVET, L., 2001 ; LAWRENCE, B.L. et coll. 1999 ; SCRIVENER, K.L., 1996 ; PETROV, N. & TAGNIT-HAMOU, A., 2004]. Cependant, le béton est au centre du problème. La raison de cette concentration de la recherche sur la pâte et le mortier est attribuable à la trop longue durée des essais sur le béton. Les résultats de ces études sont donc souvent contradictoires et contestés.

Il est généralement accepté que la formation différée de l'ettringite soit étroitement liée à une température élevée, lors de la prise du ciment et du durcissement du béton. Certains travaux récents ont démontré que la formation différée de l'ettringite, et l'expansion qui s'en suit, peut également avoir lieu dans des bétons non chauffés de l'extérieur, c'est-à-dire seulement par la chaleur d'hydratation. La température, dans les éléments massifs coulés sur place, suit généralement une évolution présentée sur la figure 4.1 [PETROV et coll, 2000].



**Figure 4.1** Évolution de la température d'hydratation d'un élément massif

La présente étude est divisée en deux parties. Dans un premier temps, la fabrication et le suivi des bétons conçus en laboratoire seront présentés. Suivront ensuite les analyses sur les bétons de structures existantes.

#### 4.1 Méthodologie

Les essais en laboratoire ont été essentiellement réalisés pour tenter de reproduire les conditions environnementales en chantier, pouvant affecter les propriétés et la durabilité des bétons. Le but étant d'atteindre une température élevée, causée par la chaleur d'hydratation, afin de simuler la coulée d'un béton dans un élément massif, en période estivale. Dans un premier temps, cinq éléments expérimentaux en forme de cube de 600 mm x 600 mm x 600 mm et des prismes « jumeaux » des cubes ont été fabriqués. Dans un deuxième temps, plusieurs séries d'échantillons prismatiques ont aussi été produites afin de valider le fonctionnement de la méthode accélérée de prédiction de l'expansion [TAGNIT-HAMOU, A. et PETROV, N., 2004] lorsque le béton est traité thermiquement à 80 °C. Après la confection et le traitement souhaité, tous les échantillons ont été conservés en laboratoire, dans une eau saturée de chaux. Le suivi des déformations/expansions s'est prolongé sur une période allant jusqu'à quatre ans.

Pour analyser des bétons existants, coulés dans des éléments massifs, des échantillons provenant de divers éléments de sept ouvrages d'art à Montréal ont été prélevés. Ces

échantillons ont été prélevés à l'aide d'une carotteuse permettant d'obtenir des éprouvettes cylindriques de 19 mm de diamètre et d'une profondeur allant jusqu'à 30 cm. Les échantillons ont par la suite été préparés, traités et analysés au microscope électronique à balayage (MEB). L'analyse permettait de vérifier s'il y avait présence ou non d'ettringite, particulièrement celle d'apparence amorphe massive qui est la forme caractéristique de l'ettringite formée tardivement (formation différée).

#### **4.2 Béton de laboratoire**

Lors de la préparation des cinq mélanges de béton, un dépassement volontaire des températures limites du béton frais, tel que prescrit dans la norme *CSA/CAN A23.1*, a été provoqué. Les conditions d'une température ambiante élevée ont été simulées, soit celles que l'on peut rencontrer en période estivale sur des chantiers, au moment de la coulée du béton d'un élément massif d'un ouvrage d'art. Pour obtenir une température de béton frais de plus de 30 °C, les granulats ont été chauffés et une eau de gâchage chaude a été utilisée. Chacun de ces mélanges a été coulé à l'intérieur de coffrages cubiques isolés, à l'aide d'un isolant à base d'uréthane. Il fallait éviter, le plus possible, la perte de chaleur lors de l'hydratation du ciment, afin de simuler un béton au centre d'un élément de masse.

L'utilisation de thermocouples et de cordes vibrantes a permis de suivre l'évolution de la température et des déformations, au centre et au périmètre, de chacun des éléments. L'évolution de ces variables a été captée et enregistrée sur un appareil de collecte de données. Les mesures ont été enregistrées à toutes les vingt minutes. Simultanément à la fabrication des éléments cubiques, des prismes de 75 mm × 75 mm × 350 mm ont été confectionnés et initialement mûris sous les mêmes conditions que les éléments cubiques. Par la suite (14 jours après la confection), une partie des prismes (deux provenant de chacun des mélanges) a été soumise à des cycles thermiques dans l'eau (essais accélérés; – TAGNIT HAMOU, A. et PETROV, N., 2004). L'autre partie des prismes a servi de contrôle (échantillons dans l'eau saturée de chaux à température constante de 20 °C, avec une variante de ± 4 °C). Les changements dimensionnels ont été suivis sur une période allant jusqu'à quatre ans.

#### 4.2.1 Matériaux utilisés

- **Ciment**

Le choix des ciments, utilisés pour la fabrication des échantillons en laboratoire, a été fait de façon à couvrir plusieurs ciments commerciaux utilisés dans l'industrie du béton au Québec (ciments de type GU, HE et ternaire). Les compositions chimiques et minéralogiques des ciments utilisés, ainsi que leurs finesses (Blaine), sont présentées au tableau 4.1.

**TABLEAU 4.1 COMPOSITION DES CIMENTS UTILISÉS**

Type de ciment	HE a	HE b*	HE c*	GU	TC <sup>3</sup>	
SiO <sub>2</sub>	19,9	20,0	19,5	19,7	31,9	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,3	5,1	4,7	4,9	8,6	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,3	2,4	2,0	2,0	4,5	
CaO	63,4	62,7	63,8	62,7	46,0	
CaO libre	1,3	0,6	0,9	1,2	-	
MgO	2,6	2,7	2,0	1,8	1,5	
SO <sub>3</sub>	4,4	3,8	3,6	3,8	2,5	
Na <sub>2</sub> O <sub>equiv</sub> **	0,90	0,91	0,83	0,77	1,20	
Finesse Blaine (m <sup>2</sup> /kg)	600	550	600	400	N/A	
Composition minéralogiques (Bogue)	C3S	50	55	66	59	N/A
	C2S	20	16	6	13	N/A
	C3A	10	10	9	10	N/A
	C4AF	7	8	6	6	N/A
SO <sub>3</sub> / Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,83	0,75	0,77	0,76	0,29	

\*Ciments utilisés seulement pour la confection des prismes traités thermiquement

\*\*Na<sub>2</sub>O<sub>equiv</sub> = Na<sub>2</sub>O(%) + 0,685K<sub>2</sub>O(%)

À la lecture du tableau, on constate qu'il y a peu de différences dans la composition chimique des ciments GU et HE-a. Cette situation est typique de la production actuelle des cimentiers. Les deux ciments sont produits avec le même clinker; leur finesse permet essentiellement de les différencier. En raison de cette composition chimique « jumelle », le ciment GU - même si sa finesse n'est pas aussi grande que celle du ciment HE - pourrait avoir un comportement similaire, soit un risque de formation différée de l'ettringite. Il y aurait donc lieu de prendre de plus en plus de précautions lors de l'utilisation de ciment de type GU pour la production des bétons de masse.

- L'eau

Pour l'eau de gâchage, l'eau provenant du système d'eau potable de la Ville de Sherbrooke a été utilisée.

- Granulats fins et grossiers

Un gros granulats, composé de calcaire métamorphique, fournit par la compagnie locale *Aimé Côté*, de Sherbrooke et ayant une dimension nominale maximale de 14 mm, a été utilisé pour fabriquer les bétons. La dimension maximale du gros granulats est déterminée en fonction de la grosseur des éprouvettes (échantillons prismatiques).

En ce qui concerne la fabrication des bétons, le sable alluvionnaire a été utilisé et fourni par la compagnie locale *Aimé Côté*. Ce sable siliceux, ayant un module de finesse de 2,37, il est considéré comme étant un sable fin.

- Adjuvants chimiques

Les adjuvants suivants ont été utilisés :

1. Un agent entraîneur d'air à base d'un dérivé d'acide gras et sulfonique appelé *Air-Extra*, produit par *Euclid Canada* et conforme à la norme *CSA-A266.1*. Cet adjuvant a une densité de 1,0 et une teneur en matières solides de 10,5 % ;
2. Un superplastifiant, à base de naphthalène sulfonate polymérisé, appelé *Eucon 37*, produit par la compagnie *Euclid Canada* et conforme à la norme *CSA 3-A266.6*. Ce superplastifiant a une densité de 1,21 et contient 42 % de matières solides ;

3. Un réducteur d'eau, à base de lignosulfonate appelé eucon wr, produit par la compagnie Euclid Canada. Ce réducteur d'eau a une densité de 1,15 et une teneur en matières solides de 30%.

#### 4.2.2 Confection des échantillons

Cinq différentes formules de mélanges de béton ont été utilisées, afin de confectionner cinq cubes de 600 mm x 600 mm x 600 mm et plusieurs échantillons prismatiques « jumeaux » (quatre par mélange), devant servir aux mesures de changement dimensionnels.

Pour fabriquer des échantillons de grandes dimensions, en forme de cube de 600 mm x 600 mm x 600 mm, des gâchées de béton de 400 litres ont été conçues dans un malaxeur à axe vertical.

Les compositions des mélanges de béton fabriqué sont présentées dans le tableau 4.2.

**TABLEAU 4.2 COMPOSITION DES BÉTONS DES CUBES**

Cube	Liant	E/C	Ciment kg/m <sup>3</sup>	Sable kg/m <sup>3</sup>	Granulat kg/m <sup>3</sup>	Affaissement mm	Vol. air %	Temp.	Masse
								Béton frais °C	
<b>M6</b>	HE	0,40	400	814	1050	80	1,5	36,5	2440
<b>M7</b>	HE	0,40	400	814	1050	180	2,0	36,1	2390
<b>M8</b>	GU	0,40	400	814	941	150	5,2	36,5	2310
<b>M9</b>	GU	0,55	320	791	990	150	2,0	36,5	2280
<b>M10</b>	TC <sup>3</sup>	0,43	415	800	1001	80	1,5	30,2	2300

Dans cette étude, des bétons ayant des rapports E/C de 0,55, ensuite de 0,40 et finalement de 0,43 ont été conçus, afin de couvrir une large plage des bétons habituellement fabriqués dans

l'industrie québécoise. Les échantillons ayant un rapport E/C de 0,55, ainsi qu'un béton ayant un rapport E/C de 0,43, ont été confectionnés sans superplastifiant ou agent réducteur d'eau. Les mélanges M7 et M8, ayant un rapport E/C de 0,40, ont été fabriqués en ajoutant du superplastifiant en quantité nécessaire pour obtenir la maniabilité visée (mesure d'affaissement de  $180 \pm 30$  mm). Pour le mélange M8, une teneur en air entraîné comprise entre 4 % et 7 %, a été visée. Le volume d'air, dans le béton frais et durci, ainsi que le facteur d'espacement des bulles d'air entraîné ont été mesurés. Tous les autres mélanges ont été confectionnés sans air entraîné.

Les matériaux pour la fabrication des échantillons cubiques ont été gardés à une température de 30 °C, dans une chambre environnementale, au moins 24 heures avant la confection des échantillons. De cette façon, la température du mélange frais a été supérieure à 30 °C.

La procédure de malaxage a été :

1. Introduction du sable dans le malaxeur, homogénéisation par malaxage pendant 30 secondes et détermination de la teneur en eau du sable ;
2. Introduction, dans le malaxeur, des gros granulats et du premier 1/3 de l'eau de gâchage, pour assurer la saturation des granulats et du sable ; malaxage pendant 30 secondes ;
3. Introduction, dans le malaxeur, du ciment et malaxage pendant 30 secondes ; addition de 2/3 de l'eau de gâchage, sans arrêter le malaxeur, jusqu'à un temps total de trois minutes, à compter de l'introduction du ciment ;
4. Temps de repos de deux minutes ;
5. Reprise du malaxage pendant trois minutes.

L'agent entraîneur d'air, pour le mélange à air entraîné, a été ajouté avec le premier 1/3 de l'eau de gâchage (point 2). Pour les mélanges contenant du superplastifiant, le dernier 2/3 de l'eau de gâchage a été divisé en deux parties égales. Le superplastifiant a été ajouté à la fin du malaxage, dans le dernier 1/3 d'eau, à la fin de la période 3.

Des cubes de 600 mm x 600 mm x 600 mm de côté ont été confectionnés à partir des mélanges M6 à M10. Le ciment de type HE a été utilisé pour la fabrication des mélanges M6 et M7 ayant un rapport E/C de 0,40 et une teneur en ciment de 400 kg/m<sup>3</sup>. Le mélange M6 ne contenait pas de superplastifiant et présentait un affaissement de 80 mm lors de la confection du cube. Le mélange M7, quant à lui, contenait du superplastifiant en quantité approximative de 1,5 l/m<sup>3</sup> afin d'augmenter l'affaissement du béton au moment de la confection du cube à 180 ± 30 mm.

Pour la confection des mélanges M8 et M9, un ciment de type GU a été utilisé. Le mélange M8 est un mélange avec air entraîné (5,2 % d'air mesuré sur le béton frais), ayant un rapport E/C de 0,40 (teneur en ciment de 400 kg/m<sup>3</sup>). Lors de la fabrication de ce mélange, du superplastifiant a été utilisé afin d'obtenir un affaissement de 180 ± 30 mm. Le mélange M9, par contre, n'avait pas d'air entraîné (air occlus de 2 %). Son affaissement a été de 150 mm, sans utilisation de superplastifiant, puisque le rapport E/C pour le mélange M9 a été de 0,55 (teneur en ciment de 320 kg/m<sup>3</sup>).

Le mélange M10 contenait 415 kg/m<sup>3</sup> de ciment ternaire (74 % GU + 22 % de cendre volante + 4 % de fumée de silice, approximativement). Un affaissement de 80 mm a été obtenu, sans utilisation de superplastifiant ou de réducteur d'eau, ce qui a nécessité un rapport E/C de 0,43. Le mélange M10 ne contenait pas d'air entraîné.

Les caractéristiques des mélanges, servant pour la fabrication des cubes de béton, sont présentées dans le tableau 4.2.

En moins de trente minutes, suivant le contact entre l'eau et le ciment, le béton a été mis en place dans les coffrages. Ces derniers étaient isolés thermiquement de l'environnement, par une couche d'isolant de résistance thermique totale de R60. Le béton est resté dans ces conditions, pendant 14 jours. Le but de l'expérience était de simuler les conditions de fabrication d'éléments massifs, dans des conditions climatiques chaudes et humides. Des cordes vibrantes, munies de thermocouples, ont été positionnées au centre et au périmètre des cubes. Après 14 jours, les cubes ont été démoulés, puis placés dans de l'eau saturée de chaux, tel que montré par les photographies de la figure 4.2





**Figure 4.2** Cubes de 600 mm x 600 mm x 600 mm de côté dans de l'eau saturée en chaux

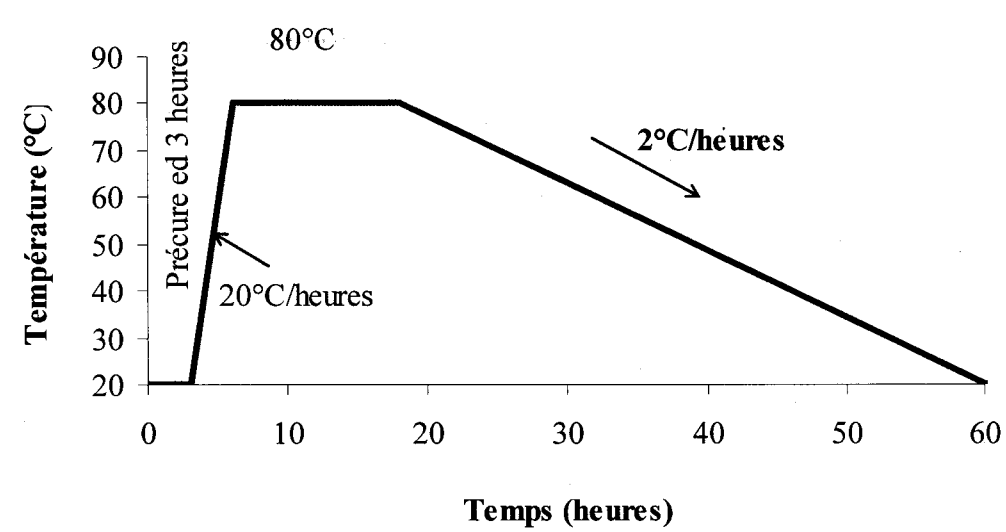
En même temps que la fabrication des cubes, quatre échantillons prismatiques « jumeaux » ont été confectionnés à partir de chacun des mélanges utilisés pour mesurer les changements dimensionnels linéaires. Deux de ces prismes ont été mûris pendant 14 jours, dans les mêmes conditions que les cubes (renfermés dans le coffrage isolé thermiquement). Un thermocouple, placé à l'intérieur d'un prisme, enregistrait la température du béton à toutes les vingt minutes, à partir de sa conception, jusqu'au démoulage (14 jours). Les deux autres échantillons prismatiques ont été mûris à la température du laboratoire. Ces échantillons servaient de témoins (NC). Les échantillons NC ont été démoulés 24 heures après leur confection et, par la suite, placés dans de l'eau saturée de chaux. La température du béton frais, au moment de la mise en place, était comprise entre 29,5 °C et 36,5 °C. Cette température du béton frais peut être atteinte durant la période estivale, sur les chantiers du Québec.

Comme dans l'étude antérieure réalisée par Petrov, les traitements thermiques ont été réalisés à des températures de 70 °C et 90 °C. L'étude veut démontrer ce qu'un traitement thermique de 80 °C peut apporter de plus comme information [PETROV, 2004]. Des bétons, de composition identique à ceux utilisés dans l'étude réalisée par Petrov, ont été fabriqués, traités à 80 °C et étudiés. Au total, trente prismes ont été confectionnés à partir de six mélanges différents. La composition des mélanges utilisés est présentée dans le tableau 4.3.

**TABLEAU 4.3** COMPOSITION DES BÉTONS DES PRISMES

Mélange	Liant type	E/C	Ciment kg/m <sup>3</sup>	Sable kg/m <sup>3</sup>	Granulat kg/m <sup>3</sup>	Affaissement mm	Vol. air %
T10 air	GU	0,55	320	990	791	60	5,6
T10	GU	0,55	300	860	1075	40	2,3
T30-a	HE	0,55	300	860	1075	40	3,0
T30-b	HE	0,55	300	860	1075	30	2,4
T30-c	HE	0,55	300	860	1075	40	2,6
TER	GUb	0,43	415	800	1001	60	5,1

Immédiatement après la confection, les prismes ont été couverts de plastique, afin de limiter l'évaporation. Un prisme est demeuré dans le moule, à la température ambiante du laboratoire, et les quatre autres prismes ont été placés dans une enceinte à une humidité relative de 100 %, pour être traités thermiquement. Les étapes du traitement thermique sont illustrées à la figure 4.3.



**Figure 4.3** Présentation schématique du traitement thermique

Durant la période initiale, qui a duré trois heures, il n'y avait pas de chauffage (température ambiante du laboratoire). Par la suite, les prismes ont été chauffés à un taux de 20 °C/heure. Une fois la température maximale de 80 °C atteinte, elle a été maintenue pendant une période de dix heures. La température, indiquée à la figure 4.3 est la température à l'intérieur de l'enceinte de cure thermique. Étant donné les dimensions des échantillons relativement petites, l'on considère que la température du béton des prismes était semblable à celle de l'enceinte. Le taux de refroidissement a été de 2 °C/heure.

Une fois le traitement thermique terminé, les cinq prismes ont été démoulés et immergés dans un bac contenant une solution saturée de chaux. Au bout d'une semaine, deux prismes ont été retirés de la solution, pour être soumis à un second traitement thermique, mais cette fois-ci cyclique [méthode accélérée d'après TAGNIT-HAMOU, A. et PETROV, N., 2004]. Les cycles thermiques dans l'eau ont duré une année. Par la suite, ces prismes ont été remis dans l'eau saturée de chaux, à température constante ( $20 \pm 4$  °C). La figure 4.4 indique les variations de température, en fonction du temps de traitement cyclique auquel les deux prismes ont été exposés.

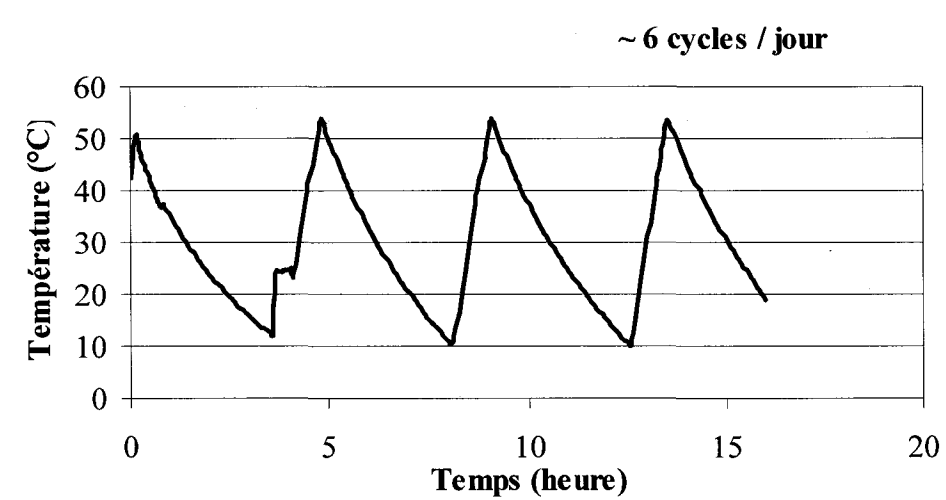


Figure 4.4 Présentation schématique du cycle thermique

La température, indiquée à la figure 4.4, est celle de la solution saturée de chaux dans laquelle les prismes ont été déposés, afin de les maintenir humide. Tout comme pour le traitement thermique, l'on considère que la température du béton des prismes, lors des cycles thermiques dans l'eau, était semblable à celle de la solution.

#### **4.3 Béton *in situ***

Pour des raisons pratiques, mais surtout pour limiter certaines variables induites par l'environnement, le type d'exposition, l'entretien, les normes de conception ou le choix des matériaux, nous avons choisi de réaliser le prélèvement des échantillons sur des structures appartenant uniquement à la Ville de Montréal. De cette manière, il est possible d'admettre que toutes les structures choisies ont été entretenues de la même façon et ont été exposées à un climat semblable.

Cette étude cherche à analyser des éléments d'ouvrages susceptibles d'avoir atteint une température élevée, lors de la prise et du durcissement. Il fallait donc choisir des structures ayant des éléments les plus massifs qui soit. La température, dans ces bétons et lors de la prise et du durcissement, peut facilement dépasser 60 °C.

Il aurait été souhaitable de prélever des échantillons sur des éléments d'ouvrage ayant été réalisés en période estivale. Une période où les températures ambiantes sont élevées, donc susceptible d'avoir influencé à la hausse la température de l'élément lors de l'hydratation. Malheureusement, les délais de conception de l'époque ont certainement dû être allongés puisque, dans la majorité des cas, les travaux de construction des ouvrages ont débuté à l'automne, pour se terminer dans les premiers mois de l'année suivante, sauf dans le cas des passages inférieurs Masson ainsi que Jarry/Querbes. Une brève description des ouvrages ainsi que des emplacements, où les échantillons ont été prélevés sera présentée.

Le temps est un facteur important dans le développement de la formation différée de l'ettringite. Les échantillons ont été prélevés sur des structures d'une moyenne d'âge d'environ 40 à 50 ans. Ces échantillons l'ont été sur des surfaces fissurées, là où la fissuration, à première vue, n'était pas due à la corrosion des barres d'armatures. Le choix des échantillons, sur les éléments désignés, a été réalisé suivant deux critères : pas de signe

visible de corrosion et aucune réaction alcalis-granulats. Nous avons tenté de prélever des échantillons aux endroits où il pourrait y avoir présence de formation différée de l'ettringite, compte tenu des dommages apparents et de la nature de l'élément en présence (notamment ses dimensions).

Au total, 18 échantillons ont été prélevés sur les éléments les plus massifs de sept structures appartenant à la Ville de Montréal, (figure 4.5) tel qu'indiqué sur le tableau 4.4 ainsi que sur les cartes situées en annexe.

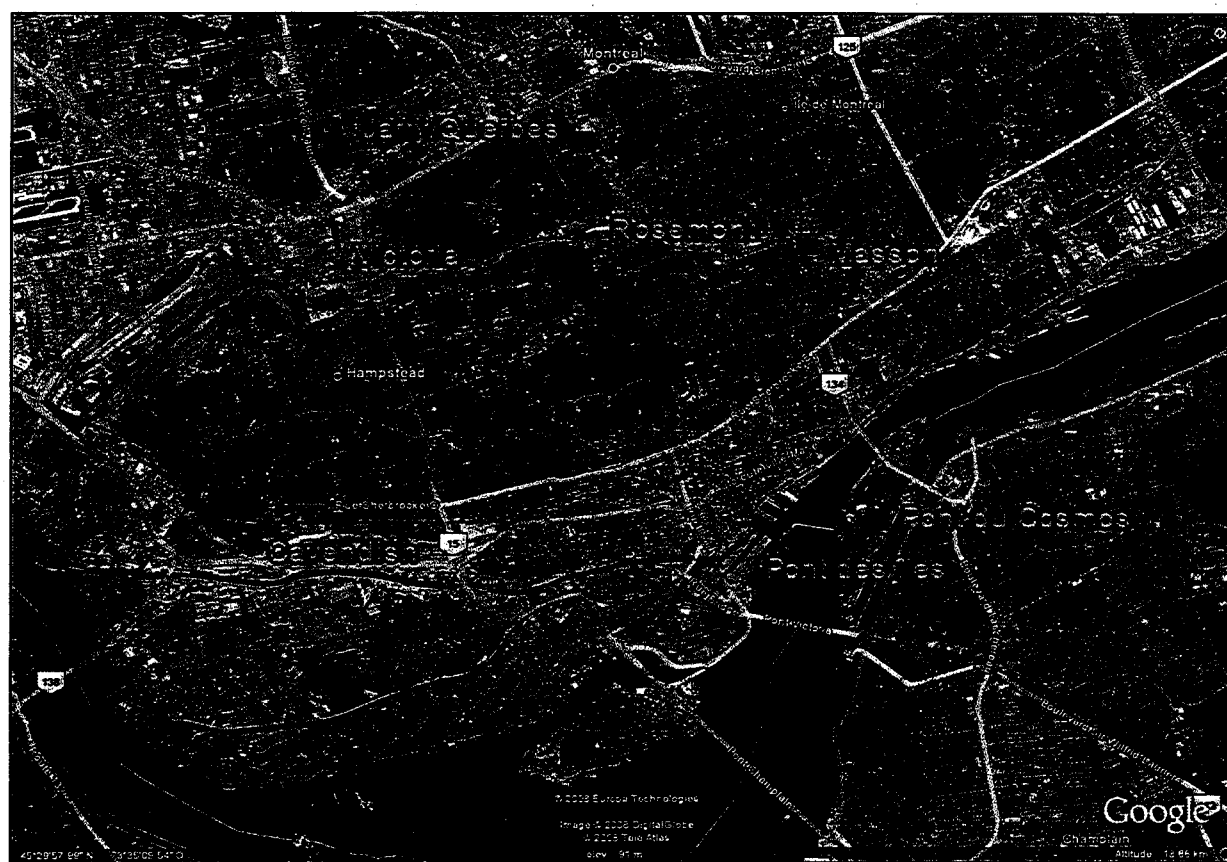


Figure 4.5 Carte de localisation des structures

**TABLEAU 4.4 ÉCHANTILLONS *IN SITU***

Structure	Nombre d'échantillon	Élément
Pont du Cosmos	2	Culée sud
Pont des Îles	1	Culée nord
Passage supérieur Rosemont/Van-Horne	2	Pilier
Passage inférieur Cavendish	1	Culée ouest
Passage inférieur Larry-Québec	2	Culée nord
Passage inférieur Masson	3	Culée nord
Passage inférieur Victoria	7	Culée sud & pile

#### 4.3.1 Localisation des échantillons

- Pont du Cosmos



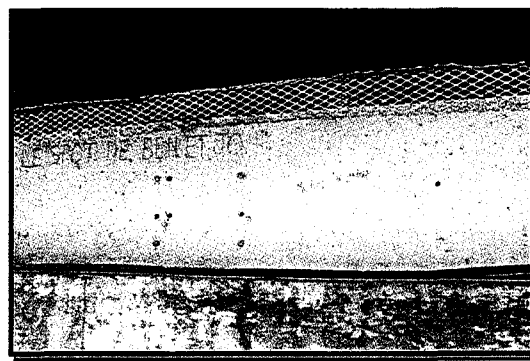
**Figure 4.6** Pont du cosmos

Cette structure, construite entre l'automne 1964 et l'été 1965, a d'abord été conçue pour n'être qu'une passerelle pour piétons, à ossature de bois. Entre 1976 et 1977, le tablier de cette passerelle a été remplacé par une structure d'acier recouvert d'un tablier de béton, pour

permettre le passage de véhicules. Toutefois, certains éléments de la structure originale ont été conservés, à savoir les culées et les piliers intermédiaires construits à même le Chenal Le Moyne. Les échantillons ont été prélevés sur le mur de la culée nord d'origine de la structure. Selon les archives disponibles, la structure d'origine a été complétée en 1965. Cela permet de déduire que les murs de la culée, habituellement construits au début de la construction d'un pont, ont été réalisés tardivement à l'automne 1964 ou au tout début de l'année 1965. Cela correspond au moment où les températures extérieures, dans la région de Montréal, sont froides et demandent aux fournisseurs de béton de chauffer, au préalable, les constituants entrant dans la fabrication du béton.

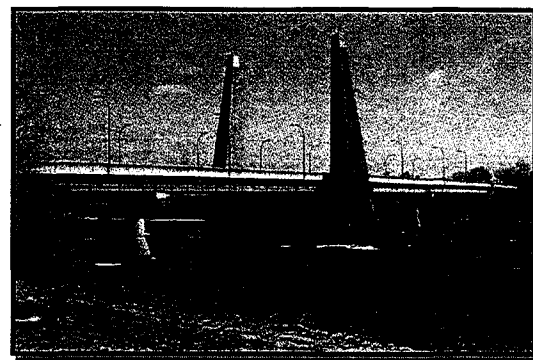
Les murs de la culée de cette structure ont été modifiés et surélevés lors de la transformation de la passerelle en pont et sont, en général, en bonne condition. Cela exclu la partie inférieure d'origine où des signes de détérioration sont visibles et où les échantillons ont été prélevés.

Les murs présentaient aussi des fissures, sans trace de rouille ou de lessivage (voir la figure 4.7)



**Figure 4.7** Mur de culé du pont du Cosmos

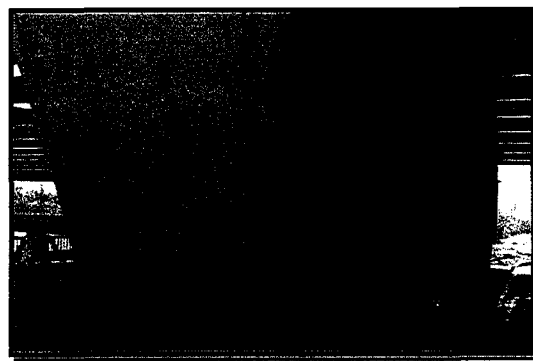
- Pont des Îles



**Figure 4.8** Pont des Îles

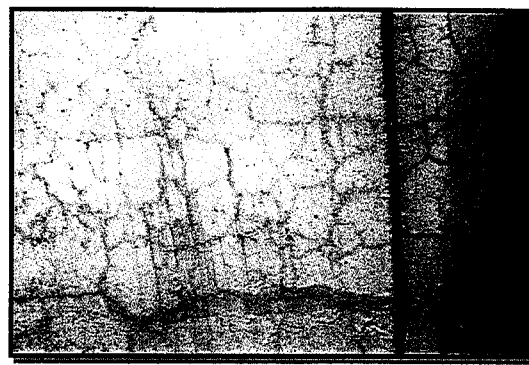
Tout comme le pont du Cosmos, le pont des Îles a été construit entre l'automne 1964 et 1965. En effet, les archives indiquent que les plans ont été terminés en juin 1964 et que le pont a été complété en 1965. Construit au départ comme un pont haubané, comportant deux portées, la superstructure d'origine a du être remplacée en 1998, pour faire place à un système structural comportant deux travées, en plus de nouveaux appuis intermédiaires. Toutefois, l'appui central ainsi que les murs de la culée ont été conservés, pour servir d'appui aux nouvelles poutres d'acier.

Nous avons choisi de prélever des échantillons, au mur de la culée nord de la structure, puisque cet élément de masse comportait un faïençage de fines fissures, comme il est possible de le voir à la figure 4.10. Ces fissures très fines, de l'ordre du demi-millimètre, ne comportent aucune trace de rouille ou d'efflorescence quelconque.



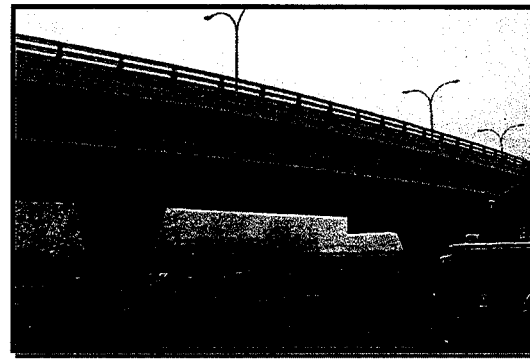
**Figure 4.9** Culée nord du pont des Îles





**Figure 4.9** Culé nord du pont des Îles

- Passage supérieur Rosemont/Van-Horne

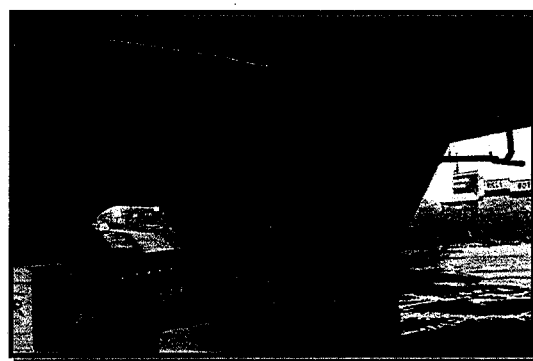


**Figure 4.11** Passage supérieur Rosemont/Van-Horne

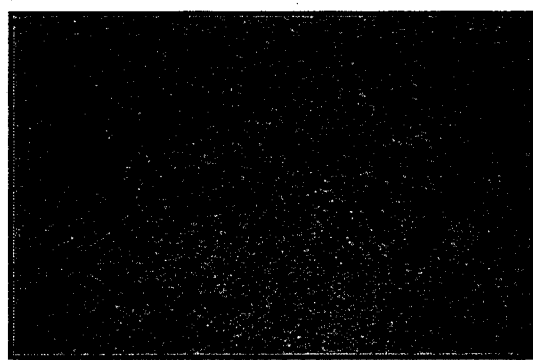
Selon les archives disponibles, cette structure a été construite entre le 22 septembre 1970 et la fin du mois de juin 1971. Donc, les éléments les plus massifs où les échantillons ont été prélevés, c'est-à-dire les piliers/chevêtres de dimension variable, de la base jusqu'au-dessous des chevêtres, ont certainement été coulés en pleine saison hivernale. Comme mentionné, l'on a choisi de prélever des échantillons sur les éléments les plus massifs du parc d'ouvrages de la Ville de Montréal et comportant, si possible, des signes de détérioration. Toutefois, dans le cas de cette structure, les piliers ne montraient aucun signe de détérioration, comme en font foi les

figures 4.12 et 4.13. La surface rugueuse que l'on peut voir à la figure 4.13 s'explique par un bouchardage « architectural » de la surface, effectué lors de la construction.

Deux échantillons ont été prélevés sur deux faces du pilier montré à la figure 4.12.

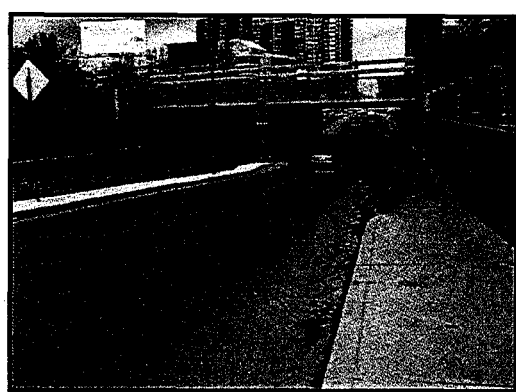


**Figure 4.12** Pilier échantillonné



**Figure 4.13** Surface bouchardée

- Passage inférieur Cavendish

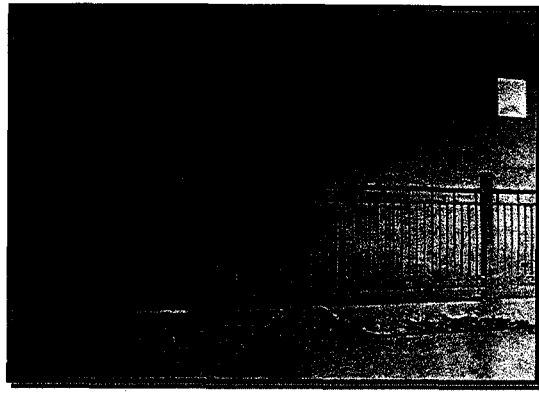


**Figure 4.14** Passage inférieur Cavendish

Construit entre le 11 septembre 1954 et le 30 mars 1955, le passage inférieur Cavendish est constitué de deux structures indépendantes, l'une contre l'autre. Il s'agit, dans les faits, d'une structure ferroviaire jumelée à une structure routière et qui ont fait l'objet d'une réfection complète, entre les étés 2004 et 2005. Les échantillons ont été prélevés sur le mur de la culée ouest de la structure ferroviaire, élément le plus massif de cet ensemble d'ouvrages. Ce mur comportait des signes légers de détérioration. Comme on peut le voir sur les figures 4.15 et 4.16, seules quelques fissures sur le mur de la culée peuvent être relevées.

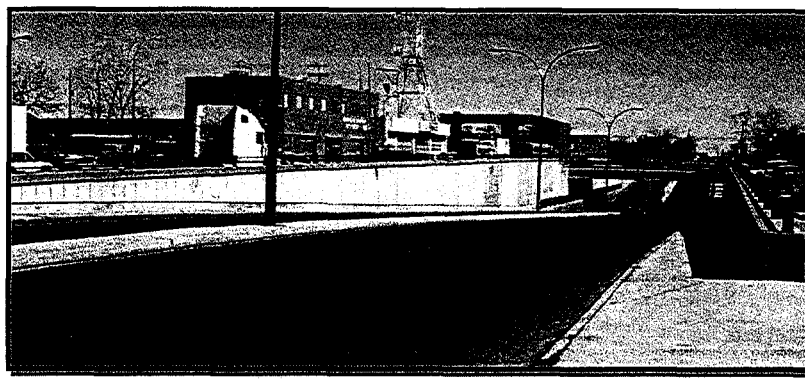


**Figure 4.15** Mur de culé ouest



**Figure 4.16** Fissures mur de culé ouest

- Passage inférieur Jarry/Querbes

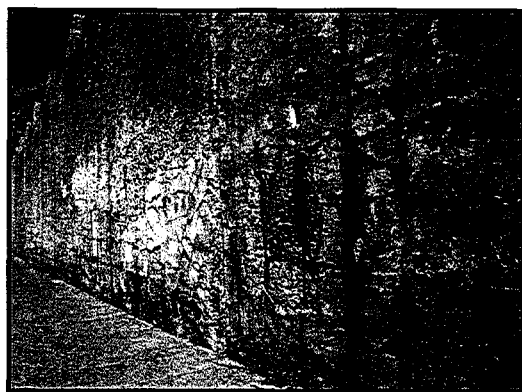


**Figure 4.17** Passage inférieur Jarry/Querbes (après réparation)

Selon les archives disponibles, le passage inférieur Jarry/Querbes a été construit entre l'automne 1955 et la fin de l'année 1956. Cet ouvrage, qui permet le passage de véhicules sous des voies ferrées, a fait l'objet d'une réparation majeure, à l'été 2003. Montrant des signes sévères de détérioration, en raison de la corrosion et de la réaction alcalis-granulats, il était pertinent de savoir s'il n'y avait pas d'autres mécanismes possibles de détérioration, compte tenu que certaines parties de cet ouvrage ont été construites durant l'été 1956.

Deux échantillons ont été prélevés dans les murs de la culée de la structure ferroviaire, avant les travaux de réparation. Ces murs comportaient les mêmes signes de détérioration que ceux

aux approches et que l'on peut voir à la figure 4.18. On peut y voir une fissuration polygonale avec efflorescence blanchâtre, à certains endroits, et d'importantes traces de rouille indiquant une activité intense de corrosion des barres d'armatures et ce, sur près de 60 % des surfaces.



**Figure 4.18** Mur de soutènement

- Passage inférieur Masson



**Figure 4.19** Passage inférieur Masson (après réfection)

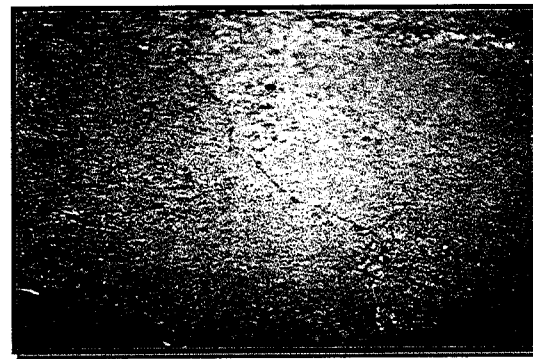
Construit entre les mois de janvier et d'août 1959, le passage inférieur Masson est constitué de trois structures indépendantes, collées les unes aux autres. Elles ont d'ailleurs fait l'objet d'un projet de réfection complète, à l'été 2005 et qui s'est terminé au mois de mai 2006. Il s'agit en fait d'une structure ferroviaire, bordée d'un virage en U de chaque côté, pour permettre la circulation automobile. L'on a choisi de prélever des échantillons, sur les murs des culées de cet ensemble de structures, puisque les éléments les plus massifs comportaient deux fois plus de surfaces fissurées ou délaménées, que les murs de soutènement situés aux approches.

Les échantillons ont, dans les fait, été prélevés dans le mur de la culée nord de la structure routière est. Les zones échantillonnées comportaient une fissuration importante, avec efflorescence blanche, le long des fissures, en raison de la carbonatation. À noter que les échantillons ont été prélevés avant les travaux de réfection.

Aux endroits échantillonnés, aucune délamination ne pouvait être relevée, contrairement aux sections plus basses du mur où, non seulement on distinguait bien de la délamination à l'aide d'un marteau, mais aussi des signes de détérioration, en raison de la corrosion des armatures.



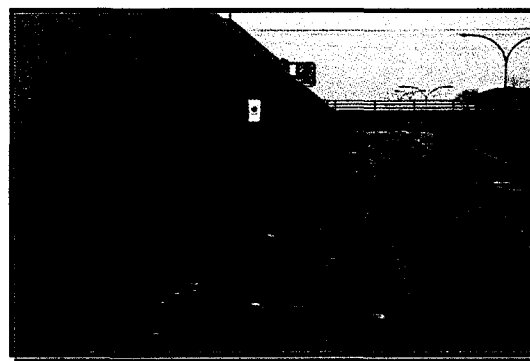
**Figure 4.20** Efflorescence mur de culé



**Figure 4.21** Fissures mur de culé

Fait important, tous les murs des culées de cet ouvrage ont fait l'objet d'une réfection, sur un peu plus de 50 % de leur surface, comparativement à environ 25 %, pour les murs situés aux approches. Cela indique donc un ou des mécanismes de détérioration plus importants dans ces sections de l'ouvrage. Les sections les plus endommagées de cette structure sont aussi les plus massives. En effet, les murs des culées de cette structure sont beaucoup plus épais que les murs de soutènement, aux approches, et donc susceptibles d'avoir subi une température élevée lors de la prise et du durcissement du béton, en raison d'un dégagement de chaleur d'hydratation.

- Passage inférieur Victoria

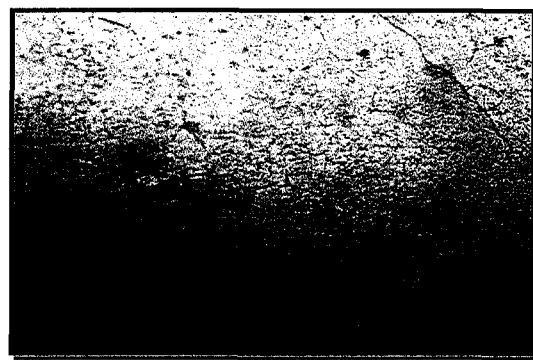


**Figure 4.22** Passage inférieur Victoria

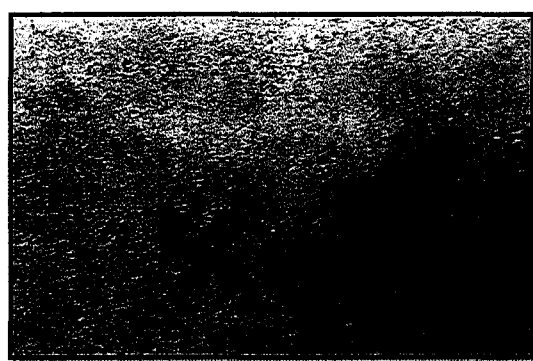
Construit entre le 1<sup>er</sup> septembre 1959 et la fin du mois de mai 1960, le passage inférieur Victoria, permettant le passage de véhicules sous des voies ferrées, a fait l'objet d'un projet de réfection, à l'été 2005.

Tout comme la structure Masson, l'on a choisi de prélever des échantillons sur les éléments les plus massifs de cet ouvrage. Les murs des culées indiquaient des surfaces fissurées, mais aussi un pourcentage élevé de surface à réparer, comparativement aux murs de soutènement situés aux approches. Un échantillon y a été prélevé ainsi que sur une des colonnes, au centre de la structure.

L'échantillonnage a été réalisé avant le début des travaux de réparation. Les sections retenues, pour la prise d'échantillons, comportaient un faïençage de fines fissures, sans trace de rouille ou quelconque efflorescence.



**Figure 4.23** Fissuration culé ouest



**Figure 4.24** Fissures culé ouest

Fait important ici, les deux murs des culées de cet ouvrage ont fait l'objet d'une réparation sur un peu plus de 50 % de leur surface, comparativement à environ 10 % pour les murs situés aux approches. Cela indique donc un ou des mécanismes de détérioration plus importants dans ces sections de l'ouvrage. Tout comme la structure Masson, les murs des culées de cet ouvrage ont une section beaucoup plus importante que les murs de soutènement situés aux approches, susceptibles d'avoir subi une température élevée lors de la prise et du durcissement du béton, en raison d'un dégagement de chaleur d'hydratation.



#### 4.3.2 Traitement et méthode d'analyse des échantillons

De tous les échantillons nous avons extrait des fractures fraîches qui ont été montées sur des porte-échantillons, traités sous vide et métallisés à l'Au-Pd, puis analysés au microscope électronique à balayage (MEB). Le microscope utilisé est un Jeol numéro JSM840A couplé à un analyseur élémentaire à dispersion d'énergie X de Link System numéro AN-10085.

La méthode d'analyse au MEB utilise l'interaction entre le faisceau d'électrons, émis sur la surface d'échantillon, et la matière elle-même. Au contact de la surface de l'échantillon, les électrons du faisceau peuvent être rétrodiffusés, absorbés dans la matière de l'échantillon ou transmis, si l'échantillon est de faible épaisseur. La probabilité d'avoir ces divers types de transformation dépend :

- De l'énergie transportée par le faisceau ;
- Du numéro atomique « Z » des éléments qui constituent l'échantillon ;
- De l'épaisseur de l'échantillon.

Les électrons du faisceau provoquent aussi :

- L'arrachement des électrons de l'échantillon (appelés électrons secondaires) avec une faible énergie ( $E < 50$  eV) ;
- Un rayonnement X, caractéristique des atomes de l'échantillon ;
- Un rayonnement lumineux.

Le principe de fonctionnement d'un microscope électronique est de capter les divers signaux provenant de l'interaction des électrons du faisceau avec l'échantillon. Ces signaux sont mentionnés ci-dessus.

Contrairement à la diffraction des rayons X, qui ne permet que l'étude des phases cristallisées, la microsonde du MEB permet une analyse chimique élémentaire ponctuelle de la matière, qu'elle soit cristallisée ou amorphe. Chaque type d'interaction électron/matière fournit un signal propre qui apporte des informations sur l'objet examiné. Pour chaque type de signal, correspond un mode de fonctionnement du MEB avec la formation d'une image. Afin d'assurer la netteté du signal, l'échantillon doit être examiné sous vide. Dans le cas du béton, des problèmes peuvent survenir car l'hydratation doit être arrêtée et l'échantillon, séché. De

plus, pour avoir l'interaction électrons/matière, qui fournira les signaux dont on a besoin, l'objet à examiner doit être conducteur. La microscopie à balayage utilise essentiellement l'émission d'électrons secondaires et d'électrons rétrodiffusés pour obtenir les images, mais aussi le rayonnement X caractéristique pour l'analyse élémentaire.

## 5 PRÉSENTATION ET ANALYSE DES RÉSULTATS

### 5.1 Bétons de laboratoire

Au total, cinq mélanges de béton différents ont été utilisés pour les essais en laboratoire (M6 à M10). Ces mélanges ont servi à la fabrication de prismes et de cubes, nécessaires au suivi thermique souhaité, tel que discuté au chapitre précédent. La présentation et l'analyse des résultats seront faits en deux temps : l'analyse des éléments cubique et des prismes.

#### 5.1.1 Analyse des éléments cubique et les échantillons prismatique «jumeaux»

La température du béton frais, au moment de la mise en place, était comprise entre 29,5 °C et 36,5 °C. Des teneurs différentes en ciment (320 kg/m<sup>3</sup>, 400 kg/m<sup>3</sup>, 415 kg/m<sup>3</sup>), ainsi que de divers types de ciment (GU, HE, ternaire) ont dégagé des quantités différentes de chaleur, causant ainsi différentes élévations de température dans le béton, lors de la prise du ciment. Les températures de béton, prises à divers moments, sont présentées dans le tableau 5.1, tandis que la période durant laquelle le béton était de température élevée est visible aux figures 5.1 et 5.2.

TABLEAU 5.1 TEMPÉRATURES DES BÉTONS UTILISÉS

Béton	Température maximale (°C)			
	Température après malaxage	Au centre du cube	Au périmètre du cube	Au centre du prisme
HE-m6	36,5	72,1	70,3	68,5
HE-m7	36,1	75,0	71,7	73,8
GU-m8	36,4	74,4	71,4	72,3
GU-m9	36,5	63,6	62,6	58,2
Ter-m10	30,2	60,3	59,2	55,1

Le graphique, présenté à la figure 5.1, montre l'évolution de la température du béton des cubes, en fonction du temps, sur une période de 14 jours. Les courbes en pointillées représentent la température, en fonction du temps, captée par les thermistances des cordes vibrantes installées sur le périmètre des cubes. Les traits pleins indiquent la température, en fonction du temps, au cœur des cubes.

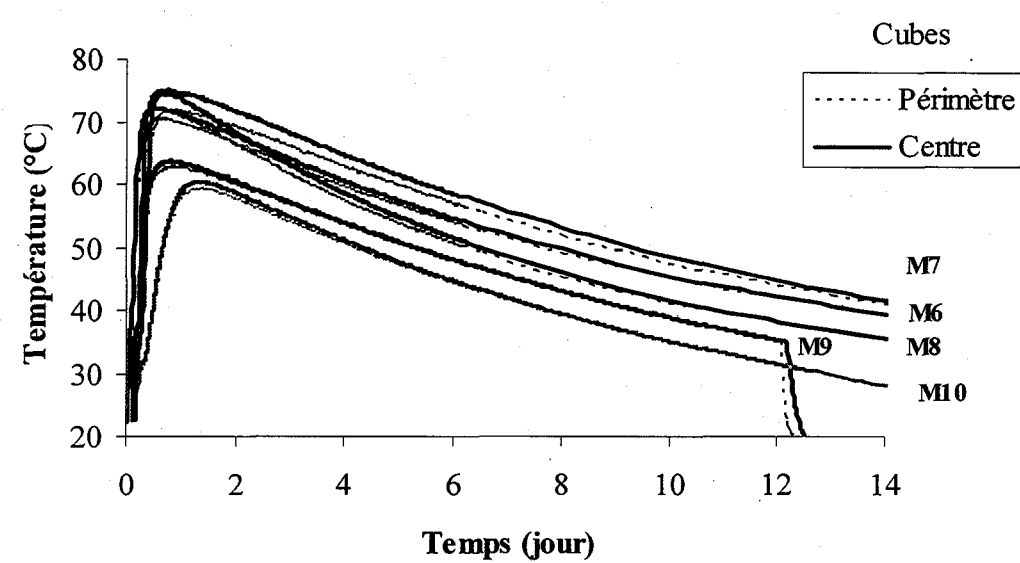


Figure 5.1 Évolution de la température des cubes

On constate, que pour chacun des cubes, la température du cœur et du périmètre a suivi la même tendance. De plus, pour chacun des mélanges, on constate que la température, au cœur, a toujours été légèrement supérieure. Cette situation est normale, compte tenu de la perte de chaleur au périmètre [JOHANSEN et THAULOW, 1999]. La température, au centre des cubes réalisés avec les mélanges M6, M7 et M8, a été plus élevée que 70 °C, pendant plusieurs heures. Les mélanges M7 et M8 ont toutefois développé une température plus grande que le mélange M6, de l'ordre de 3 °C. Ces trois mélanges ont une teneur en ciment de 400 kg/m<sup>3</sup>, tandis que le mélange M9 a une teneur en ciment de 320 kg/m<sup>3</sup>. La différence de teneur en ciment explique l'écart des maximums de température entre les mélanges M8 et M9, de l'ordre de 10 °C. Les cubes M6 et M7 ont été fabriqués avec un ciment de type HE, tandis que

les cubes M8 et M9 ont été fabriqués avec un ciment GU. Par contre, il n'y a presque pas de différences dans la composition chimique de ces deux ciments utilisés (voir le chapitre 4).

Le mélange M10 a atteint une température maximale de 60 °C, une situation normale, compte tenu que le ciment ternaire ne comporte que 74 % de ciment Portland, soit 307 kg/m<sup>3</sup> de béton.

La baisse subite de température, du mélange M9 au douzième jour, indique que le démoulage et la mise en eau ont été réalisés au douzième jour et non au quatorzième.

Le graphique, présenté à la figure 5.2, démontre l'évolution de la température du béton des prismes mûri sous des conditions identiques aux cubes correspondants, sur une période de quatorze jours.

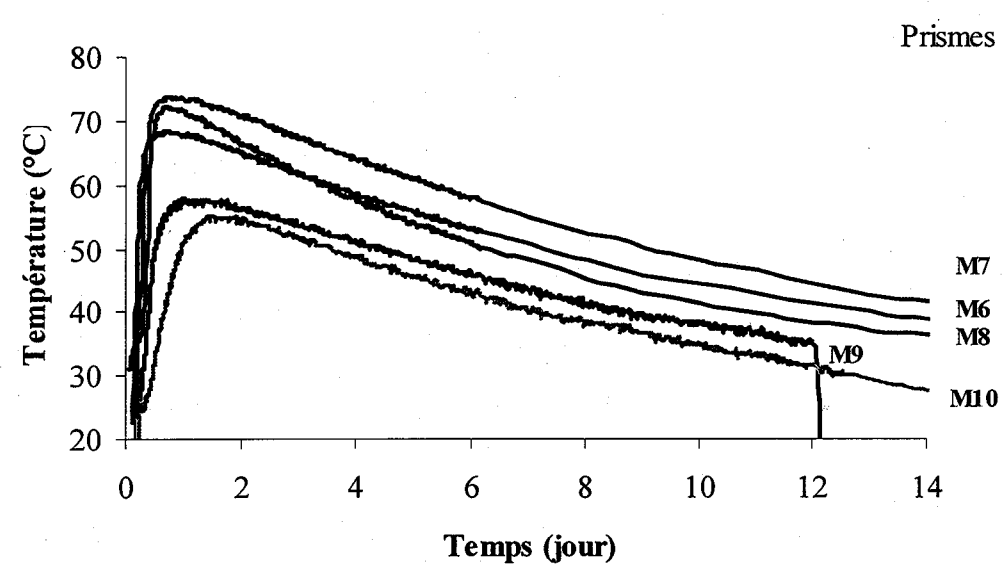
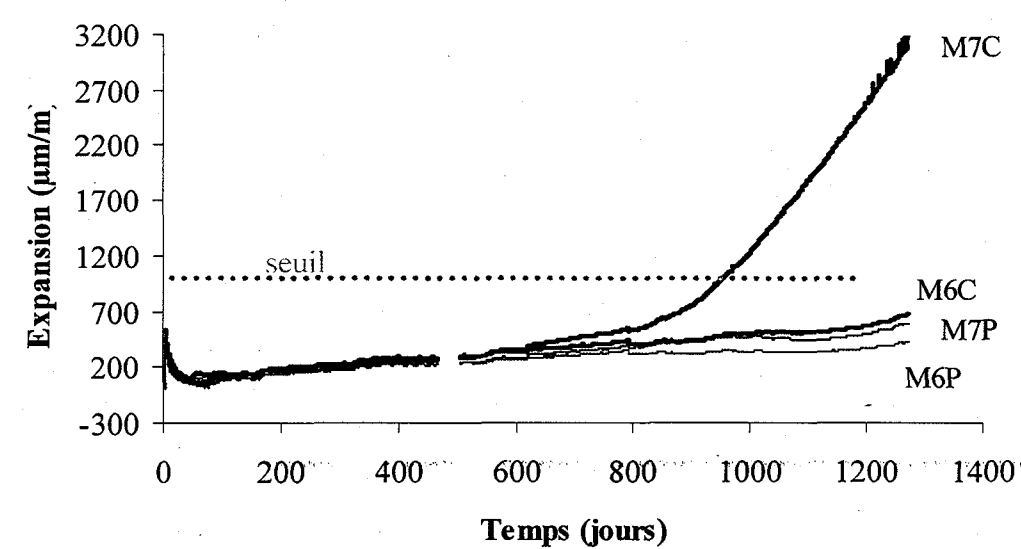


Figure 5.2 Évolution de la température des prismes

On constate, pour chacun des prismes, que la température a suivi la même tendance que la température des cubes. La température du prisme, réalisé avec le mélange M8, a été plus élevée que 70 °C, pendant environ une journée, alors que la température du béton du prisme M7 a maintenu une température supérieure à 70 °C, pendant environ deux jours. Les mélanges M7 et M8 ont développé une température plus grande que le mélange M6, de l'ordre de 4 °C.

La différence de teneur en ciment explique l'écart des maximums de température entre les mélanges M8 et M9, de l'ordre de 14 °C. Le mélange M10 a développé une température maximale de 55 °C, une situation normale, compte tenu du type de ciment utilisé (ternaire). La baisse subite de température, du mélange M9 au douzième jour, indique que le démoulage et la mise en eau ont été réalisés au douzième jour et non au quatorzième.

Le graphique, présenté à la figure 5.3, démontre l'évolution de la déformation des bétons des cubes fabriqués avec les mélanges M6 et M7, sur une période de plus de 1200 jours. Les courbes M6P et M7P représentent l'expansion, en fonction du temps capté par les cordes vibrantes installées sur le périmètre des cubes. Les traits M6C et M7C indiquent la déformation, en fonction du temps capté par les cordes vibrantes placées au cœur des cubes.



**Figure 5.3** Expansion des cubes (mélanges M6 et M7)

Les mélanges M6 et M7 ont été fabriqués avec un ciment de type HE. Dans les deux cas, la température maximale, au cœur des cubes, a dépassé 70 °C. L'expansion du mélange M7 a débuté à environ 850 jours. Dans le cas du mélange M6, une amorce d'expansion est remarquée vers la fin de l'enregistrement des données, autour de 1200 jours après la confection des cubes.

Les résultats des essais, réalisés par Petrov (communication personnelle, voir figure 5.3-A) avec un mélange identique au mélange M6, démontrent une évolution de l'expansion similaire aux résultats indiqués par la courbe M6C, à la figure 5.3. Une collecte de données, au-delà de 1200 jours, aurait sans doute indiqué une expansion plus grande de ce béton. L'écart de temps, pour obtenir de l'expansion entre les mélanges M6 et M7, peut s'expliquer par l'utilisation d'un superplastifiant (source de sulfates), dans le mélange M7. Comme les températures maximales atteintes, au périmètre des deux cubes, ont également dépassé 70 °C, il est possible de croire que l'on aurait obtenu de l'expansion, même au périmètre des deux cubes, sur une période de temps plus longue. À la figure 5.3 et les suivantes, le trait pointillé orangé représente le seuil d'expansion à partir duquel une expansion du béton est considérée comme étant significative. Ce seuil a été fixé à 1000  $\mu\text{m/m}$ .

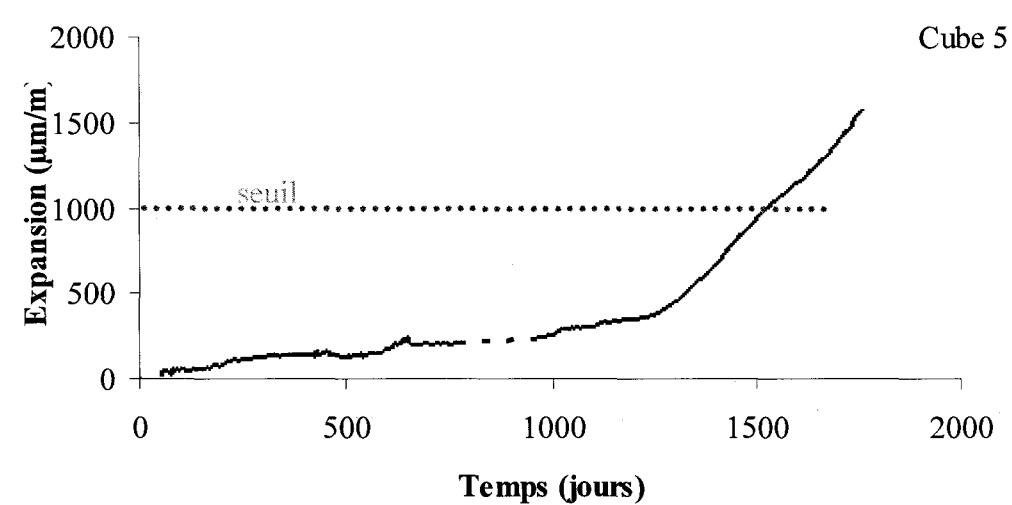


Figure 5.3A Expansion du cube No 5

Le graphique, présenté à la figure 5.4, démontre l'évolution de la déformation des prismes fabriqués avec les mélanges M6 et M7 (mélanges fabriqués avec le ciment de type HE), en fonction du temps, sur une période de plus de 1500 jours. Les courbes en rouge sont tracées avec des traits pleins, pour une période d'environ 850 jours. Durant cette période, les lectures ont été prises en continu, environ tous les mois. Par la suite, le trait pointillé indique une évolution, estimée normalement, suivie jusqu'aux derniers points encerclés. Ces points sont les dernières lectures prises sur les prismes. Les résultats, présentés par les courbes rouges et

bleues, sont la moyenne obtenue des lectures prises sur deux prismes fabriqués avec le même mélange.

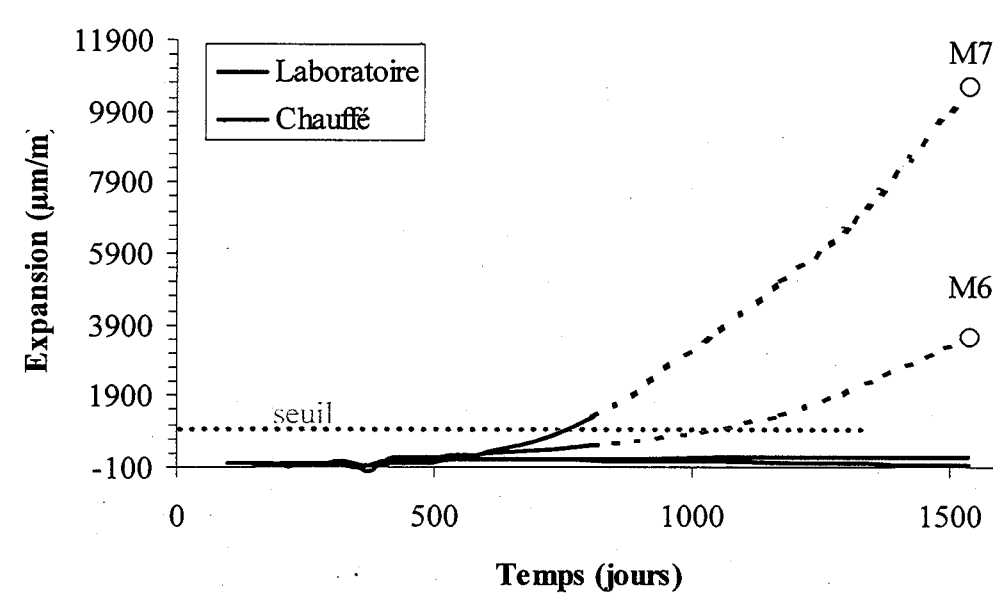


Figure 5.4 Expansion des prismes (mélanges M6 et M7)

Les résultats, démontrés par ce graphique, indiquent une expansion des prismes fabriqués avec les mélanges M6 et M7 (courbes rouges) et qui ont été conservés pendant 14 jours, sur les cubes. Le béton du prisme M7 a donc été chauffé à une température d'un peu plus de 73 °C alors que le béton du prisme M6 a été chauffé à environ 68 °C. Par contre, les prismes conservés à la température du laboratoire (environ 20 °C) n'ont montré aucune expansion (courbes bleues). L'expansion de 3700 µm/m environ des prismes fabriqués avec le mélange M6, après 1500 jours et telle qu'indiquée par cette figure, confirme que le cube fabriqué avec ce mélange aurait présenté une expansion plus grande que si l'on avait poursuivi la collecte des données, au-delà de 1200 jours (figure 5.3).

Le graphique, présenté à la figure 5.5, démontre l'évolution de la déformation des cubes fabriqués avec les mélanges M8 et M9, en fonction du temps, sur une période d'environ 1200 jours. Ces deux mélanges ont été fabriqués avec un ciment de type GU.



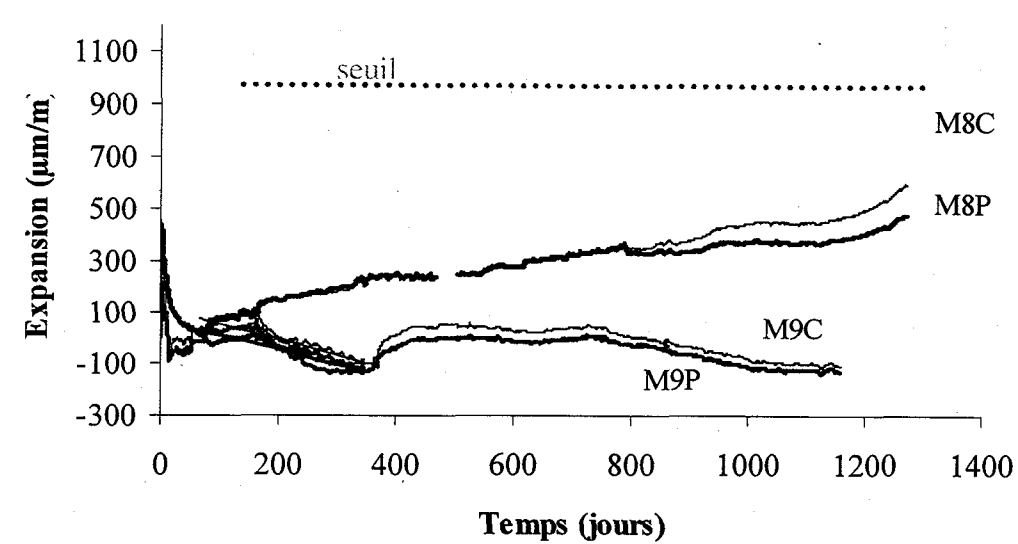


Figure 5.5 Expansion des cubes (mélanges M8 et M9)

Les résultats, démontrés par le graphique de cette figure, indiquent un écart de déformation entre les deux cubes fabriqués avec les mélanges M8 et M9. L'écart de température maximale de près de 10 °C, au centre des deux cubes, peut expliquer cette différence de comportement. En effet, le cube fabriqué avec le béton M8 a atteint une température au cœur de plus de 74 °C, alors que l'autre cube n'a atteint que près de 64 °C. Fait intéressant, le cube fabriqué avec le mélange M8 montre un début d'expansion significatif, même si le béton a été fabriqué avec un ciment de type GU et qu'il a un peu plus de 5 % d'air entraîné. À simple titre de rappel, le mélange M8 comportait 400 kg/m<sup>3</sup> de ciment, alors que le mélange M9 n'en comportait que 320 kg/m<sup>3</sup>. Par ailleurs le rapport E/C est de 0,40 et de 0,55 respectivement pour les mélanges M8 et M9.

L'expansion retardée du M8 malgré la température atteinte, est probablement due à sa teneur en air (5%). Nous croyons que le cube aurait pris beaucoup plus d'expansion si la lecture des données avait été prolongée au-delà des 1250 jours.

Le graphique, présenté à la figure 5.6, démontre l'évolution de la déformation des prismes fabriqués avec les mélanges M8 et M9, en fonction du temps, sur une période d'environ 1500 jours. La courbe en rouge, nommée M8, est tracée avec un trait plein pour une période d'environ 850 jours. Durant cette période, les lectures ont été prises en continu, à environ tous

les mois. La courbe en bleu, nommée M9, est tracée avec un trait plein pour une période d'environ 450 jours. Comme la courbe rouge durant cette période, les lectures ont été prises en continu, à environ tous les mois. Par la suite, le trait pointillé indique une évolution, estimée normalement, suivie jusqu'au dernier point encerclé. Ces points encerclés sont les dernières lectures prises sur les prismes. Les résultats, présentés par les courbes rouges et bleues, sont la moyenne obtenue des lectures prises sur les deux prismes fabriqués avec le même mélange.

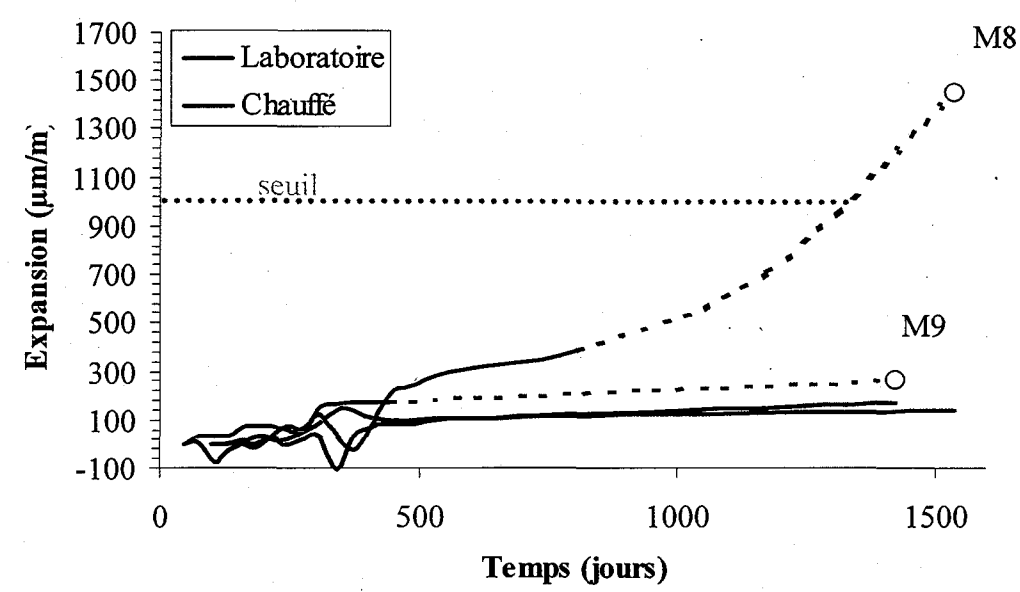
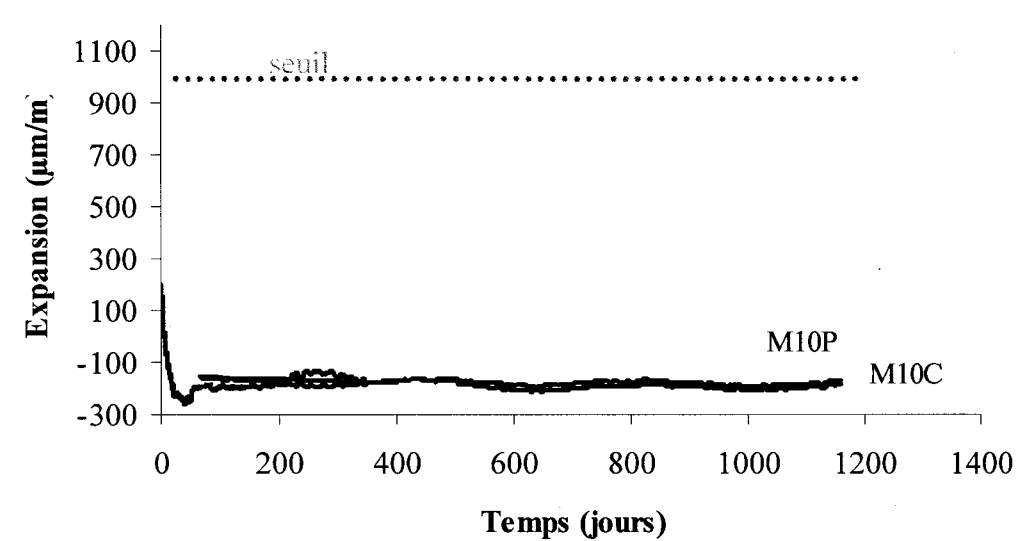


Figure 5.6 Expansion des prismes (mélanges M8 et M9)

Les résultats, démontrés par ce graphique, indiquent une expansion des prismes fabriqués avec les mélanges M8 et qui ont été conservés pendant 14 jours, sur les cubes. Le béton a donc été chauffé à une température d'environ 74 °C. Pour le mélange M9, même si les prismes ont été conservés à la chaleur, sur le cube, on ne remarque aucune expansion. Cette situation est normale, compte tenu que la température maximale du prisme n'a pas atteint 60 °C. Les prismes, conservés à la température du laboratoire (environ 20 °C), n'ont montré aucune expansion et ce, pour les deux mélanges (courbes bleues). L'expansion des prismes fabriqués avec le mélange M8, d'environ 1 500 µm/m et après 1400 jours, telle qu'indiquée à la figure 5.6, confirme que le cube fabriqué avec ce mélange aurait montré une expansion plus grande que si l'on avait poursuivi la collecte des données, au-delà de 1250 jours (figure 5.5).

Le graphique, présenté à la figure 5.7, démontre l'évolution de la déformation du cube fabriqué avec le mélange M10, en fonction du temps, sur une période d'un peu moins de 1200 jours. Ce mélange a été fabriqué avec un ciment ternaire.



**Figure 5.7** Expansion de cube (mélange M10)

Les résultats, démontrés par ce graphique, n'indiquent aucune expansion du cube fabriqué avec le mélange M10. Ce résultat n'est pas surprenant, compte tenu du type de ciment et que la température maximale atteinte, au cœur du cube, était de 60 °C seulement.

Le graphique, présenté à la figure 5.8, démontre l'évolution de la déformation des prismes fabriqués avec le mélange M10, en fonction du temps, sur une période d'environ 1500 jours. Les courbes sont tracées avec des traits pleins, pour une période d'environ 500 jours. Durant cette période, les lectures ont été prises en continu, à environ tous les mois. Par la suite, le trait pointillé indique une évolution, estimée normalement, suivie jusqu'au dernier point encerclé. Ces points sont les dernières lectures prises sur les prismes. Les résultats, présentés par les courbes rouges et bleues, sont la moyenne obtenue des lectures prises sur deux prismes fabriqués avec le même mélange.

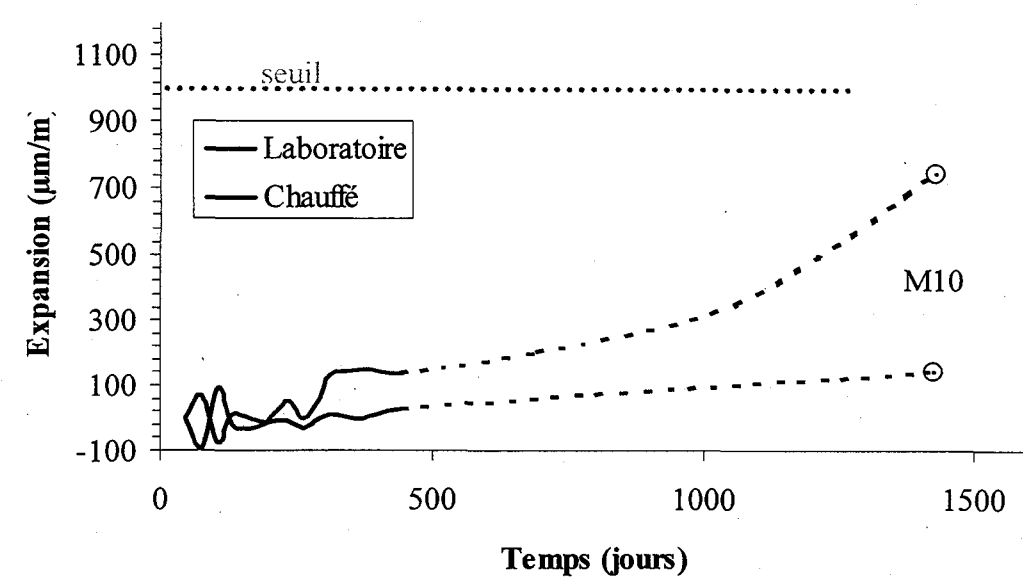


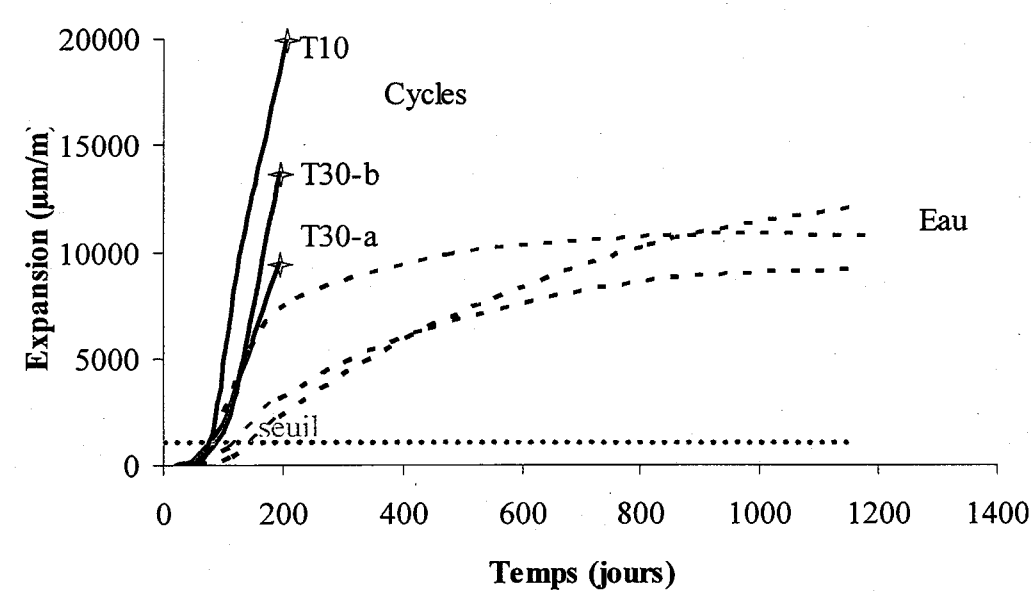
Figure 5.8 Expansion des prismes (mélange M10)

Les résultats, démontrés par ce graphique, indiquent un début ou une amorce d'expansion des prismes fabriqués avec le mélange M10 (courbe rouge) et qui ont été conservés pendant 14 jours, sur le cube. Le béton a donc été chauffé à une température d'environ 55 °C. Par contre, les prismes conservés à la température du laboratoire (environ 20 °C) n'ont montré aucune expansion (courbe bleue). L'expansion des prismes fabriqués avec le mélange M10, de 750 µm/m après 1400 jours et indiquée sur cette figure, laisse croire que, si la température maximale au cœur du cube fabriqué avec ce mélange avait dépassé 70 °C, l'expansion pourrait être significative. Cette situation va à l'encontre de la recherche précédente [PETROV, 2004] qui prétend que les ajouts minéraux assurent une protection contre l'expansion causée par la formation différée de l'ettringite. Des recherches supplémentaires, plus axées sur l'influence des ajouts minéraux sur la formation différée de l'ettringite, sont donc nécessaires.

#### 5.1.2 Analyse des échantillons prismatique traités thermiquement à 80 °C

Le graphique, présenté à la figure 5.9, démontre l'évolution de la déformation de divers prismes fabriqués avec différents mélanges de béton sans air entraîné, en fonction du temps, sur une période allant jusqu'à 1200 jours.. Le symbole T10 indique l'utilisation d'un ciment de type GU, alors que le symbole T30 indique l'utilisation d'un ciment HE. Les appellations T10 et T30 sont conservées afin de faciliter la comparaison des résultats antérieurs [PETROV,

2004]. Les traits pleins indiquent les résultats de l'expansion des prismes ayant subi un traitement thermique cyclique, alors que les traits pointillés indiquent les résultats de l'expansion des prismes conservés dans l'eau saturée de chaux, sans traitement thermique. La fin des courbes, tracées avec des traits pleins, est marquée d'une étoile, afin d'indiquer que les prismes se sont brisés à ces niveaux de déformation et qu'aucune lecture supplémentaire de déformation n'était valable. Les résultats, présentés par les courbes, sont la moyenne obtenue des lectures prises sur deux prismes fabriqués avec le même mélange.

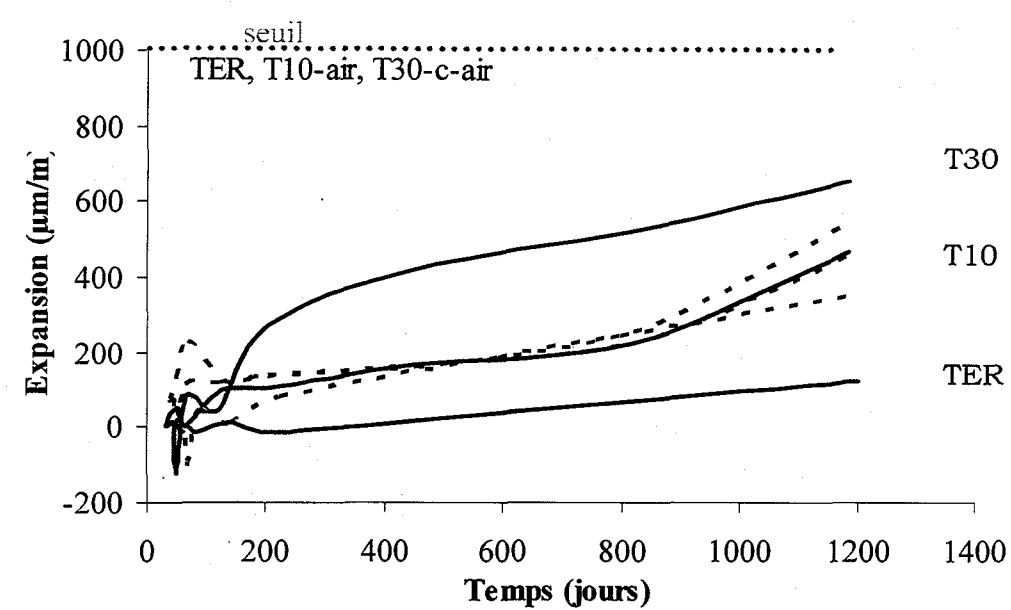


**Figure 5.9** Expansion des prismes des mélanges sans air entraîné

Dans tous les cas, les prismes ont pris une expansion significative (plus de 1000  $\mu\text{m/m}$ ), en moins de 200 jours. Le traitement thermique cyclique a provoqué une expansion beaucoup plus rapide et a mené à une destruction des prismes, en moins de 200 jours et ce, pour tous les mélanges.

Le graphique, présenté à la figure 5.10, démontre l'évolution de la déformation de différents prismes fabriqués avec différents mélange de béton, en fonction du temps, sur une période allant jusqu'à 1200 jours.. Le mélange TER est un béton sans air entraîné, fabriqué avec du ciment ternaire (tableau 3), tandis que les mélange T10-air et T30-c-air sont des bétons avec

air entraîné fabriqués respectivement avec des ciments GU et HE. Les traits pleins indiquent les résultats de l'expansion des prismes ayant subi un traitement thermique cyclique, alors que les traits pointillés indiquent les résultats de l'expansion des prismes conservés dans l'eau saturée de chaux, sans traitement thermique cyclique. Les résultats, présentés par les courbes, sont la moyenne obtenue des lectures prises sur les deux prismes fabriqués avec le même mélange.



**Figure 5.10** Expansion des prismes des mélanges avec air entraîné

Dans tous les cas, les prismes n'ont pas pris une expansion significative (plus de 1000  $\mu\text{m/m}$ ). On ne remarque pas non plus d'évolution de la déformation des échantillons, selon que les prismes aient été soumis à des cycles thermiques sous l'eau ou non.

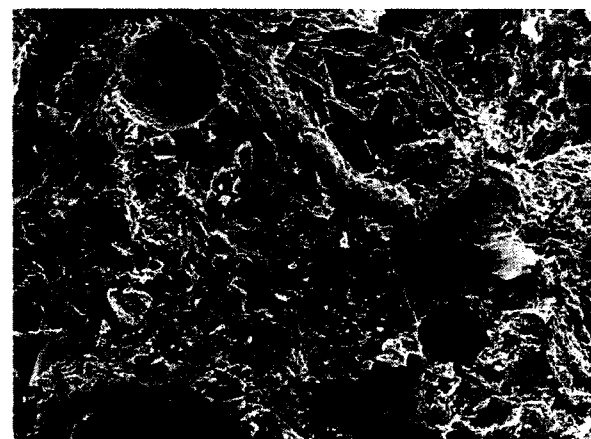
## 5.2 Bétons *in situ*

Les résultats de l'analyse du MEB, des échantillons prélevés sur chacun des ouvrages et présentés à la section 4.3, seront ici soumis. Ces échantillons ont été analysés à l'aide d'un microscope électronique à balayage afin de permettre l'évaluation de la présence ou de l'absence d'ettringite formée tardivement. Préalablement aux analyses du MEB, une recherche

et une analyse des données existantes, dans les archives disponibles à la Ville de Montréal, ont été effectuées. Cette recherche dans les archives a permis d'obtenir des informations partielles sur les périodes de construction. Malheureusement, très peu ou pas d'informations, sur les caractéristiques des matériaux utilisés pour la construction de ces structures, n'étaient disponibles. Toutefois, les informations récoltées ont été utiles pour le choix des structures et des éléments à analyser. L'utilisation du MEB et l'analyse des micrographes ont permis de confirmer la présence ou non de formation différée de l'ettringite. Pour chacun des ouvrages, les principaux micrographes et les analyses élémentaires utilisées et ce, pour chacune des sept structures, seront présentés.

- Pont du Cosmos

Selon les archives, les murs de la culée, où ont été prélevés les deux échantillons, indiquent des signes modérés de déficience. Les culées de cet ouvrage auraient été construites, selon toute vraisemblance, au printemps 1965. Le béton des culées aurait été coulé sous des températures favorables à une bonne cure.



Pâte fissurée et poreuse. Aucun dépôt d'ettringite dans les bulles d'air entraîné.

Figure 5.11 Micrographe 1

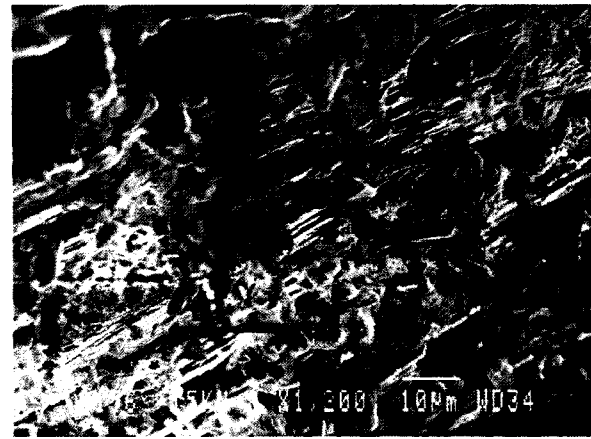




Les micrographes indiquent que le béton des culées du pont du Cosmos est sain. On est d'ailleurs en présence d'une pâte moyennement poreuse, avec un réseau de bulles comportant peu ou pas d'ettringite cristallisée ou d'autres dépôts (figures 5.11 et 5.13). Aucune trace d'ettringite aux interfaces et de RAG n'a été observée.

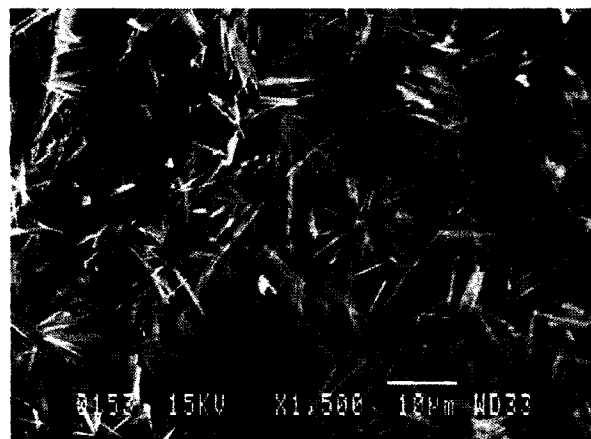
- Pont des Îles

Un seul échantillon a été prélevé à partir de la culée nord de cet ouvrage. Les culées de cet ouvrage ont vraisemblablement été construites en période hivernale de 1966, compte tenu du calendrier de réalisation du projet. L'état du béton observé est relativement bon, comparativement à d'autres ouvrages analysés.



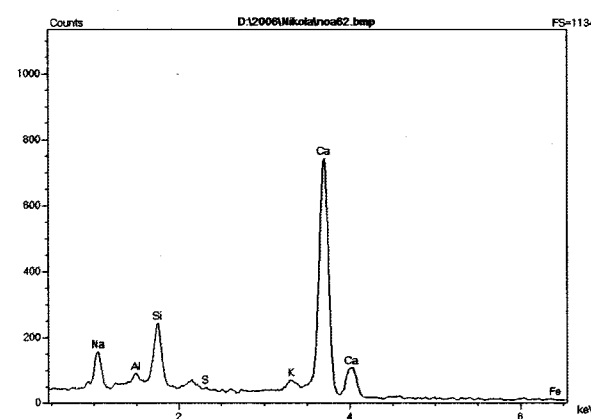
Pâte hydratée, poreuse et fissurée.

Figure 5.15 Micrographe 3



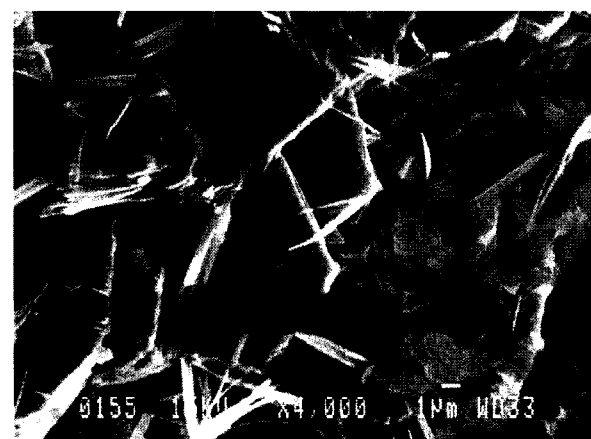
Cristaux d'ettringite.

Figure 5.16 Micrographe 4



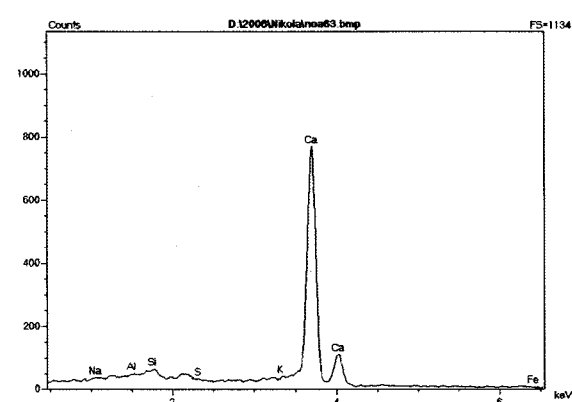
Analyse élémentaire du micrographe 4 (figure 5.16).

Figure 5.17 Analyse élémentaire 3



Portlandite.

Figure 5.18 Micrographe 5



Analyse élémentaire du Micrographe 5 (figure 5.18).

**Figure 5.19** Analyse élémentaire 4

Bien que la pâte observée soit fissurée et poreuse (figure 5.15), les micrographes indiquent la présence d'un béton relativement sain. Il est possible d'observer la présence d'ettringite bien cristallisée, donc non expansive (figure 5.16) ou de la portlandite (figure 5.18), à certains endroits. Il est aussi possible de croire que la température du béton est demeurée sous le seuil critique, compte tenu des résultats, mais aussi du calendrier de réalisation. La fissuration observée en surface est peut être reliée aux divers types de retrait ou à d'autres causes.

- Passage supérieur Rosemont-VanHorne

Les analyses, effectuées sur les deux échantillons de béton provenant du passage supérieur Rosemont/Van Horne, montrent qu'il y a une importante quantité de portlandite dans la pâte (figure 5.20), indiquant l'absence de la lixiviation. Parfois, la portlandite précipite à nouveau dans les bulles d'air (figure 5.22). Une situation qui est normale pour un béton exposé à des intempéries. Par contre, les bulles d'air, dans la plupart des cas observés, sont exemptes de tout dépôt. Ce cas indique qu'elles protègent bien le béton contre le gel et le dégel et que le béton est en bon état (figure 5.23). On distingue bien l'apparence d'un béton relativement jeune et sain.

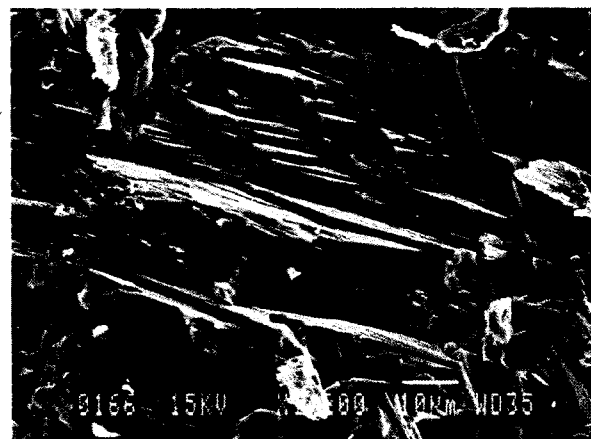


Figure 5.20 Micrographe 6

Portlandite

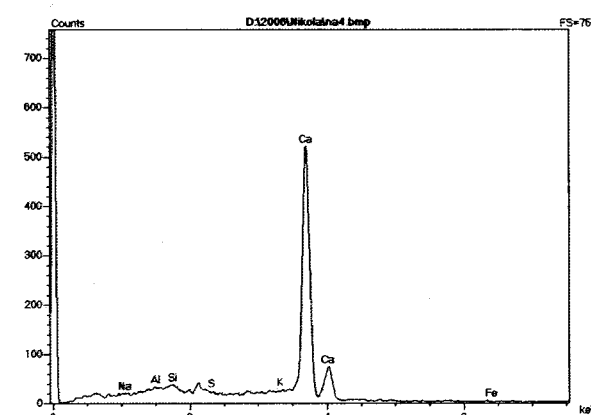


Figure 5.21 Analyse élémentaire 5

Analyse élémentaire du micrographe 6 (figure 5.20).

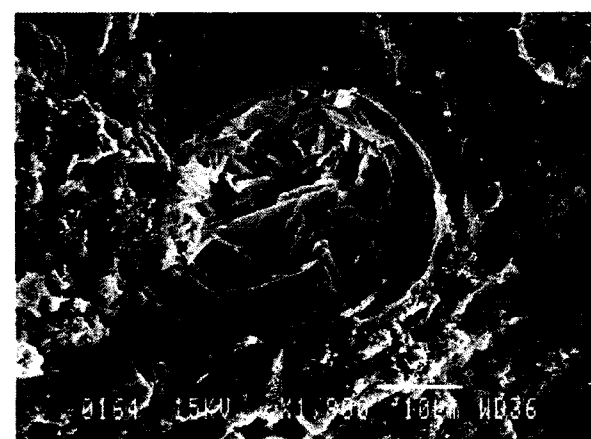
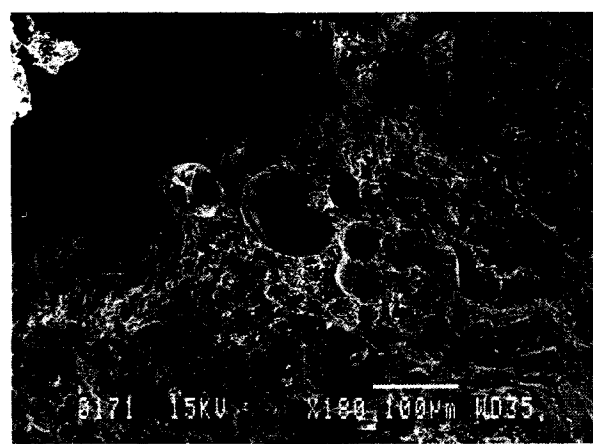


Figure 5.22 Micrographe 7

Bulle d'air remplie de cristaux d'ettringite, typique d'un vieux béton.



Un bon réseau de bulles d'air entraîné; les bulles sont vides.

**Figure 5.23** Micrographe 8

L'observation des échantillons permet de constater que le béton des piliers est en bon état, qu'il a sûrement été mis en place et mûri sous des conditions favorables de température.

- Passage inférieur Cavendish

Compte tenu de l'état relativement sain de cet ouvrage, un seul échantillon a été prélevé sur le mur de culée est de la structure ferroviaire. Rappelons que cet ouvrage a été réalisé pendant l'automne et l'hiver 1954.



**Figure 5.24** Micrographe 9

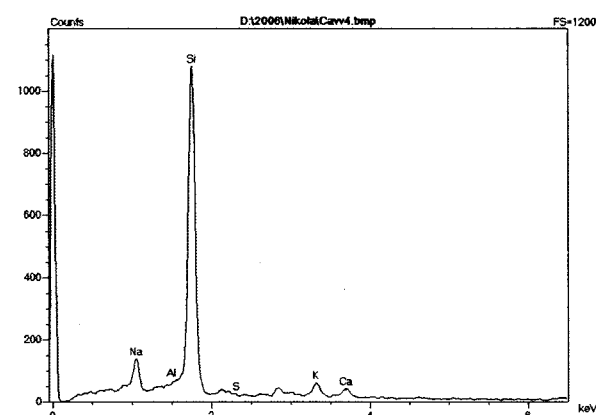


Figure 5.25 Analyse élémentaire 6

Analyse élémentaire du Micrographe 9 (figure 5.24).

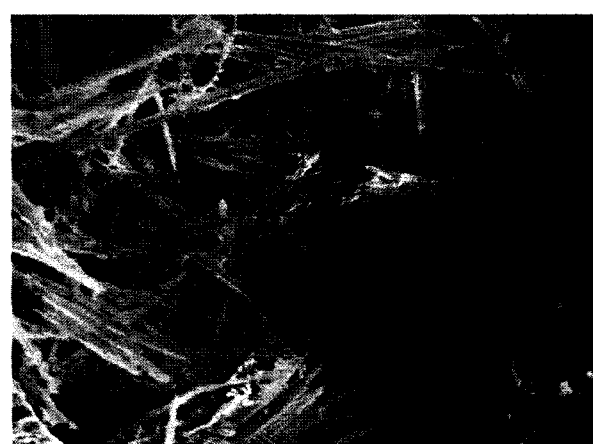


Figure 5.26 Micrographe 10

Cristaux d'ettringite.

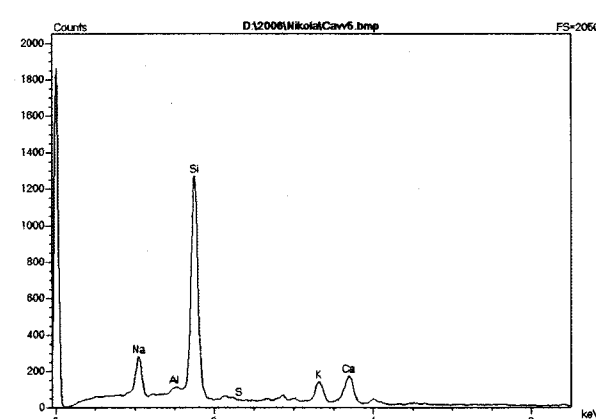


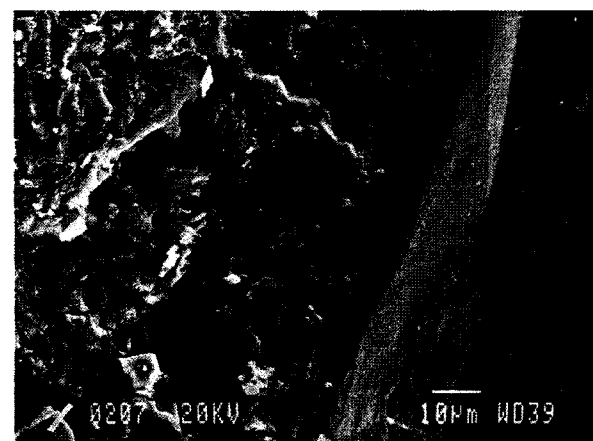
Figure 5.27 Analyse élémentaire 7

Analyse élémentaire du Micrographe 10 (figure 5.26).

Les échantillons analysés et provenant de cette structure indiquent bien que le béton en présence commence à prendre de l'âge. Le réseau de bulles comporte peu d'ettringite cristallisée. Toutefois, une cure du béton, sous des températures favorables, a sans doute contribué aux bonnes performances de ce béton, coulé dans un élément massif. Aucune trace d'ettringite aux interfaces et de RAG n'a été observée.

- Passage inférieur Jarry/Querbes « échantillon No 1 »

Deux échantillons ont été prélevés sur cet ouvrage. L'échantillon 1 a été prélevé près de la surface du mur de la culée du passage inférieur Jarry/Querbes. Selon les données des archives, il y a des fortes probabilités que les murs de la culée analysés aient été construits à l'été 1956, en pleine période estivale. Lors du prélèvement des échantillons, il a été constaté que le béton de la culée présentait de nombreux signes de détérioration (fissuration, délamination, efflorescence, trace de corrosion).



Interface pâte/granulats; aucun dépôt d'ettringite dans l'interface.

**Figure 5.28** Micrographe 11

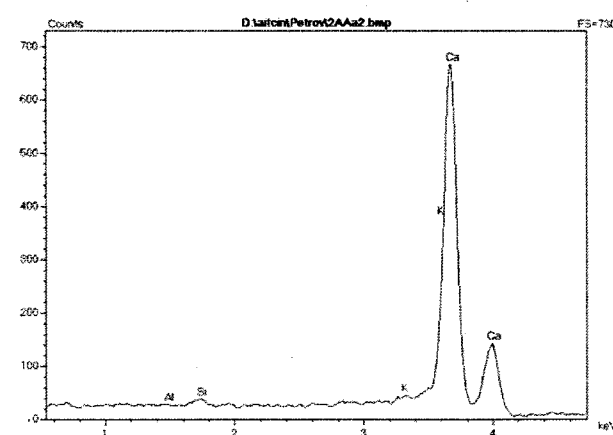


Figure 5.29 Analyse élémentaire 8

Analyse élémentaire du granulat calcaire, présentée au micrographe 11 (figure 5.28).

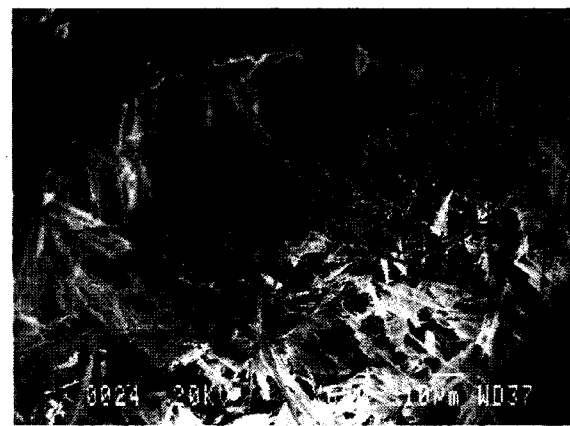


Figure 5.30 Micrographe 12

Bulles d'air entraîné avec des cristaux d'ettringite, caractéristiques pour des vieux bétons.

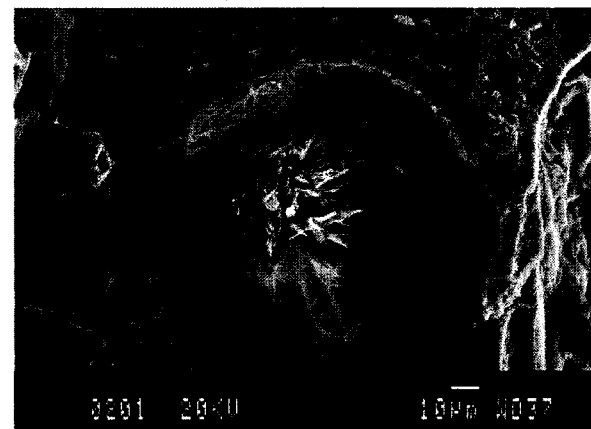


Figure 5.31 Micrographe 13

Cristaux d'ettringite agglomérés dans une bulle d'air entraîné. Une précipitation souvent causée par l'effet des cycles de gel et de dégel.



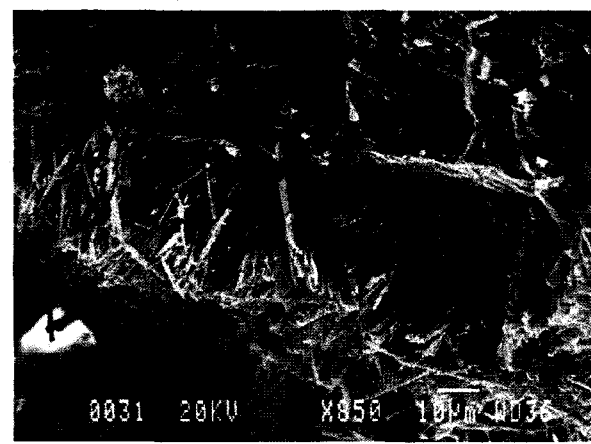


Figure 5.32 Micrographe 14

Important dépôt d'ettringite, parfois d'apparence massive, dans l'interface pâte/granulats; caractéristique de la DEF.

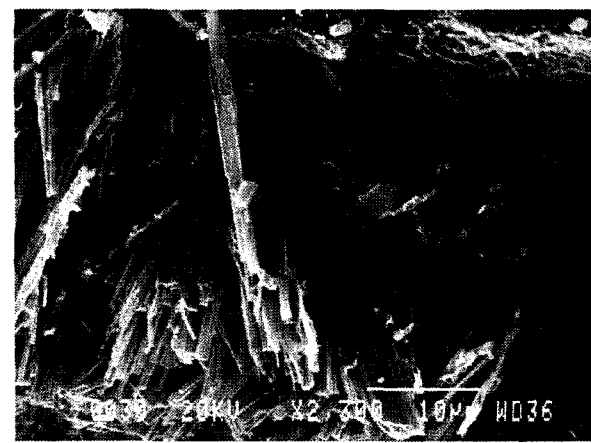


Figure 5.33 Micrographe 15

Grossissement du micrographe 14 (figure 5.32).

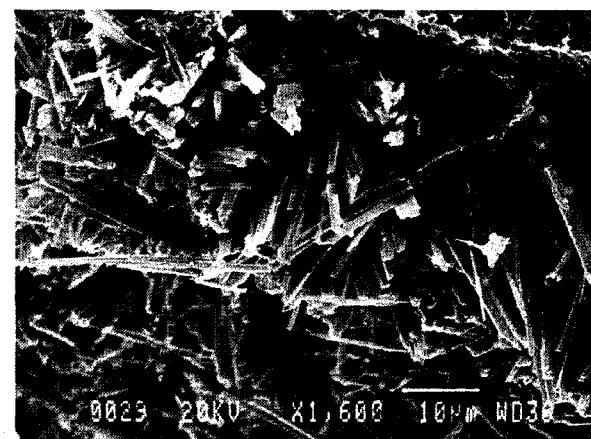


Figure 5.34 Micrographe 16

Important dépôt d'ettringite cristallisée dans l'interface pâte/granulats.

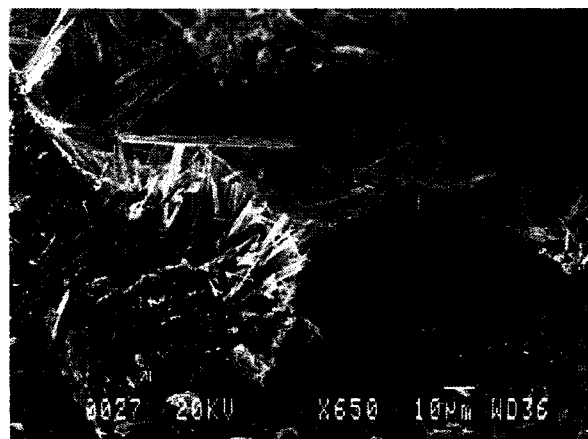


Figure 5.35 Micrographe 17

Idem au micrographe 16 (figure 5.34).

À certains endroits, l'interface pâte/granulats est exempte de dépôt d'ettringite (figure 5.28), tandis qu'à d'autres endroits, d'importants dépôts ont été observés (figures 5.32 à 5.35). Cette ettringite est cependant bien cristallisée, quoique l'abondance de cristaux peut donner l'impression d'une ettringite compactée ou massive.

Les bulles d'air entraîné ne sont que partiellement remplies d'ettringite (figures 5.30 et 5.31), situation que l'on retrouve habituellement dans des bétons ayant subi plusieurs cycles de gel et dégel (plusieurs hivers).

- Passage inférieur Jarry/Querbes « échantillon No 2 »

L'échantillon 2 observé a été prélevé à une profondeur de 30 cm et à six mètres de distance de l'échantillon 1.

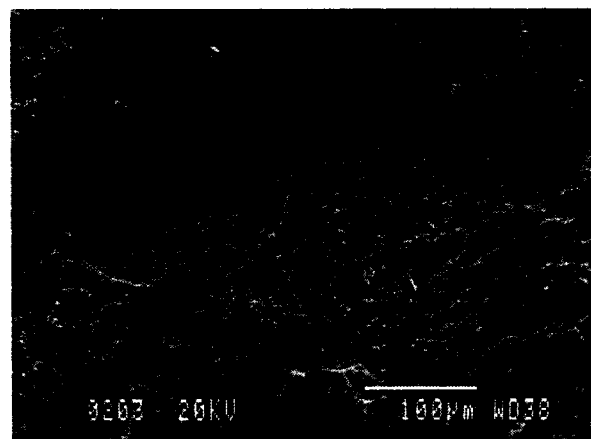


Figure 5.36 Micrographe 18

Ettringite mal cristallisée dans l'interface, d'apparence massive.

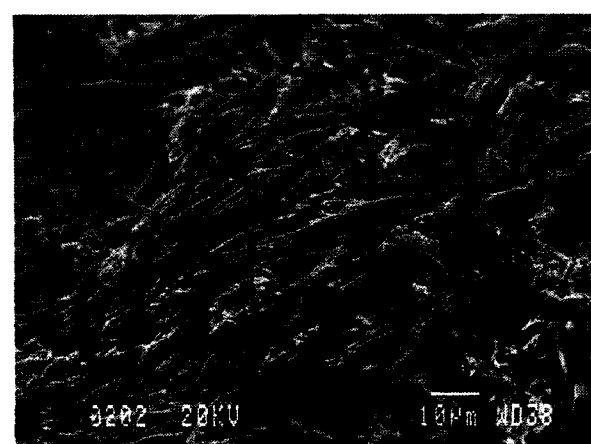


Figure 5.37 Micrographe 19

Grossissement du micrographe 18 (figure 5.36).

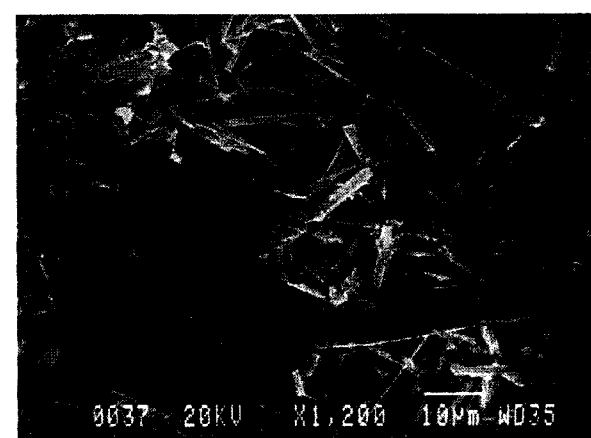


Figure 5.38 Micrographe 20

Ettringite mal cristallisée dans l'interface, d'apparence amorphe.

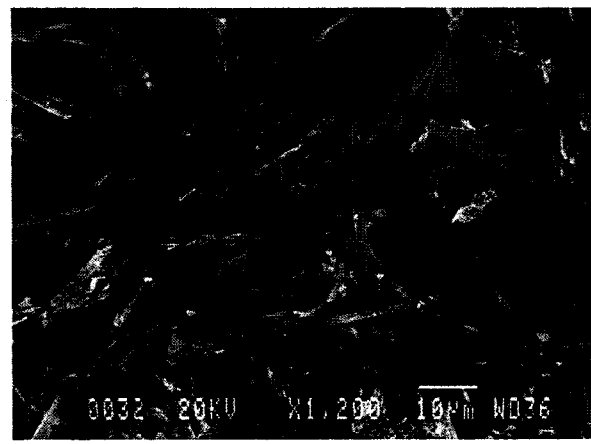


Figure 5.39 Micrographe 21

Ettringite mal cristallisée dans l'interface, d'apparence amorphe.

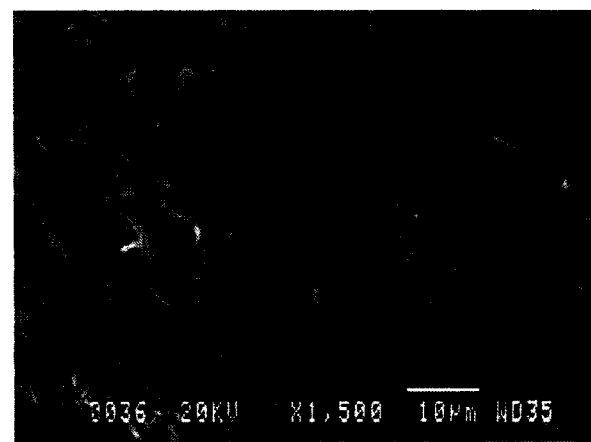


Figure 5.40 Micrographe 22

Masse ettringitique amorphe dans la pâte; caractéristique de la DEF (observée très rarement dans l'échantillon analysé).

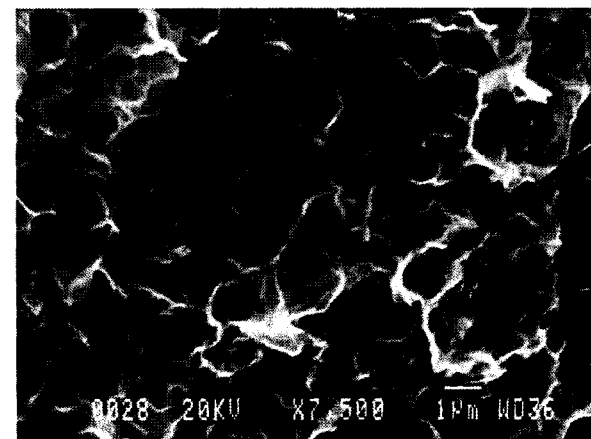


Figure 5.41 Micrographe 23

C-S-H très poreux; une conséquence de la lixiviation de la chaux.

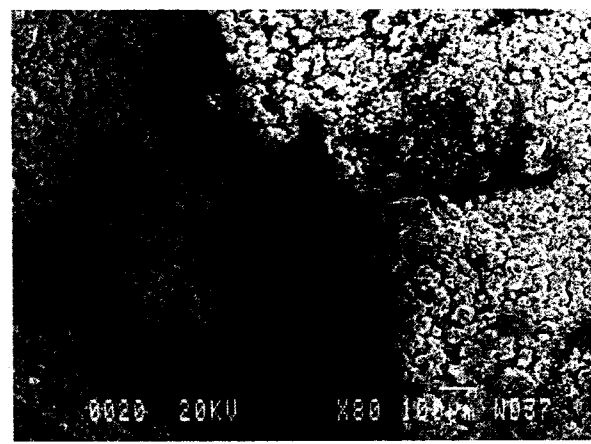


Figure 5.42 Micrographe 24

Gel siliceux; produit de la RAG.

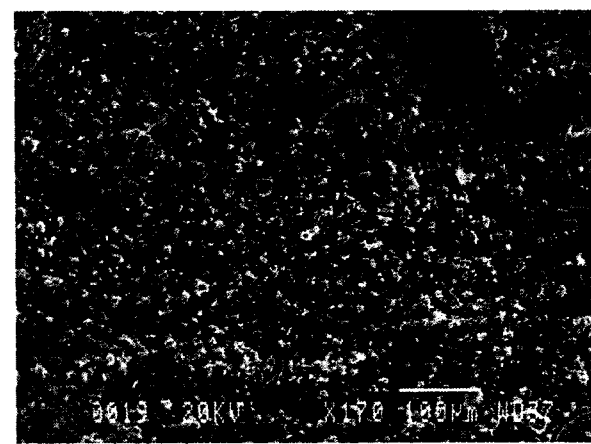


Figure 5.43 Micrographe 25

Idem au micrographe 24 (figure 5.42).

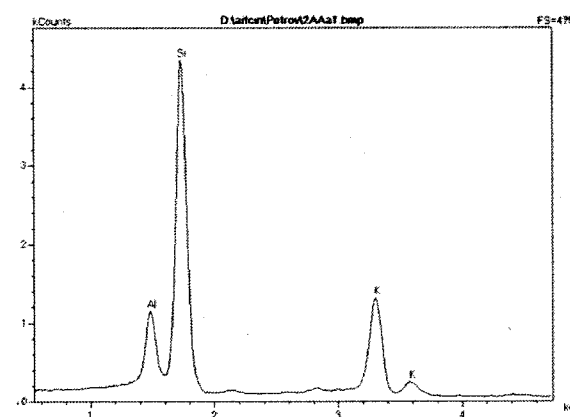


Figure 5.44 Analyse élémentaire 9

Analyse élémentaire du gel présenté aux micrographes 24 et 25 (figures 5.43 et 5.44).

Les analyses, effectuées sur les échantillons de béton provenant du passage inférieur Jarry/Querbes, montrent l'hétérogénéité du béton analysé. L'analyse des deux échantillons indique qu'à seulement six mètres de distance, le béton du même mur présente une microstructure complètement différente. Les micrographes du béton de l'échantillon 1 montrent des dépôts d'ettringite bien cristallisée dans les bulles d'air entraîné et qu'il n'y a aucun signe de la RAG ou d'ettringite massive, mal cristallisée. Les bulles d'air ne sont pas complètement remplies par les dépôts d'ettringite. Toutefois, sur un des micrographes, il est possible d'observer, à l'interface pâte/granulats, un important dépôt d'ettringite, parfois d'apparence compressée, sans trace de la RAG.

Le béton de l'échantillon 2 est très différent. Il présente d'importants dépôts d'ettringite, qui n'est pas toujours bien cristallisée (figures 5.36 à 5.39). Le gel de la RAG est également observé (figures 5.42 et 5.43). Il est possible, lors de la construction, qu'une section (région de prélèvement de l'échantillon 2) ait subi une montée de température considérablement plus importante que celle de la région de prélèvement de l'échantillon 1. D'ailleurs, les dépôts d'ettringite analysés (figures 5.38 à 5.40) présentent des traces d'ettringite formée tardivement.

- Passage inférieur Masson

Construits en 1959, selon les archives, les murs de la culée, où ont été prélevés les trois échantillons, ont été coulés en pleine période estivale. Les échantillons ont été prélevés sur le mur de la culée nord de la structure ferroviaire. Les murs de la culée de cet ouvrage comportaient une fissuration importante, avec efflorescences blanches.

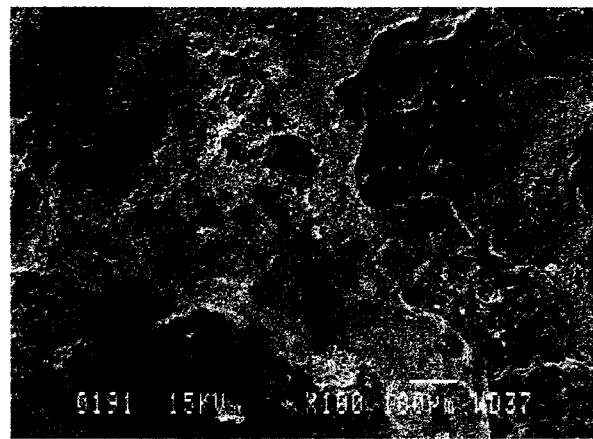


Figure 5.45 Micrographe 26

Portlandite et carbonate de calcium.

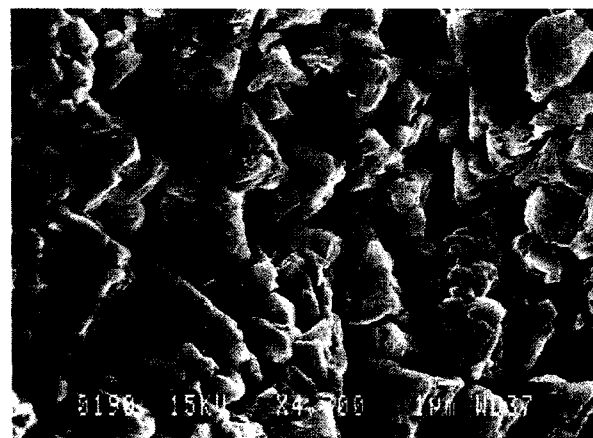


Figure 5.46 Micrographe 27

Vue rapprochée du micrographe 26 (figure 5.45), carbonate de calcium.

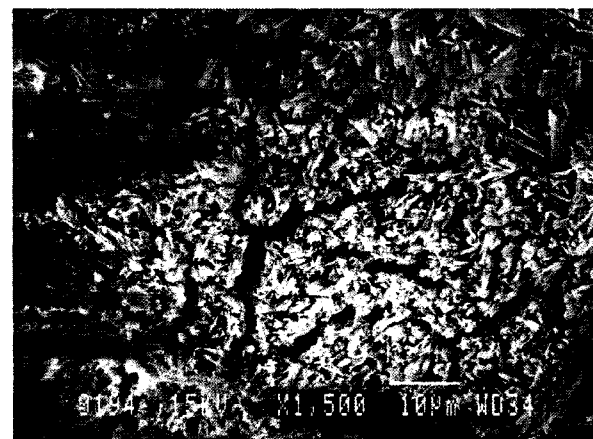


Figure 5.47 Micrographe 28

Mélange d'ettringite cristallisée et comprimée dans l'interface.



Figure 5.48 Micrographe 29

Mélange d'ettringite cristallisée et comprimée dans l'interface.



Figure 5.49 Micrographe 30

Mélange d'ettringite cristallisée et comprimée dans l'interface, montrant l'abondance et la généralité du phénomène.

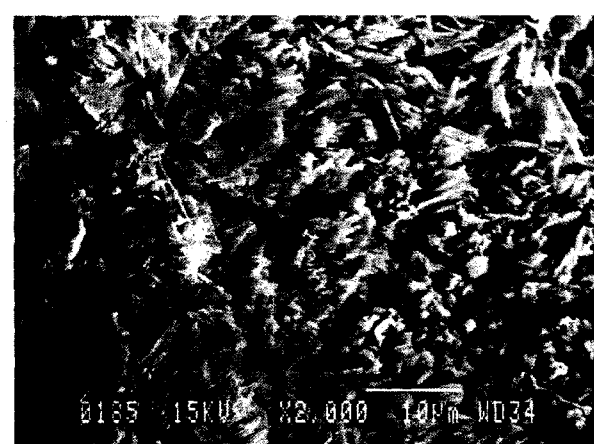


Figure 5.50 Micrographe 31

Mélange d'ettringite cristallisée et comprimée dans l'interface montrant l'abondance et la généralité du phénomène.



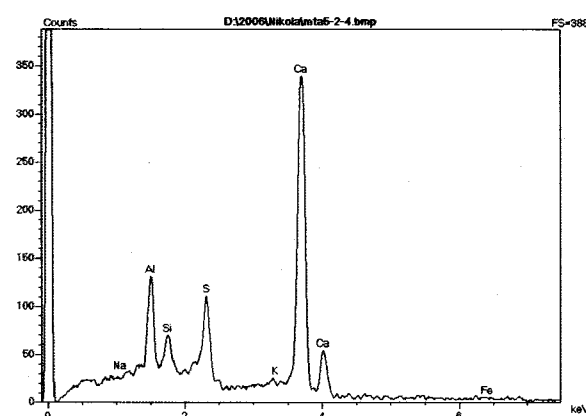


Figure 5.51 Analyse élémentaire 10

Analyse élémentaire du micrographe 30 (figure 5.49).

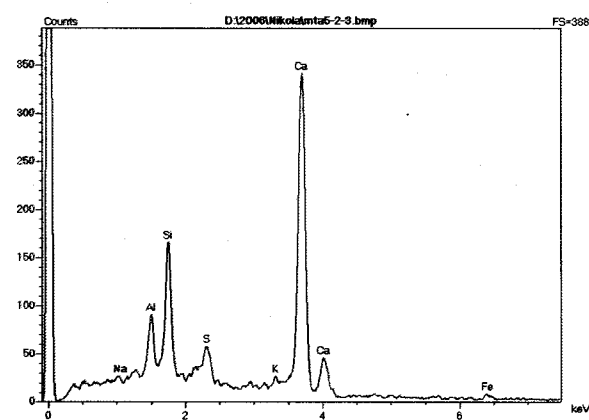


Figure 5.52 Analyse élémentaire 11

Analyse élémentaire du micrographe 31 (figure 5.50).

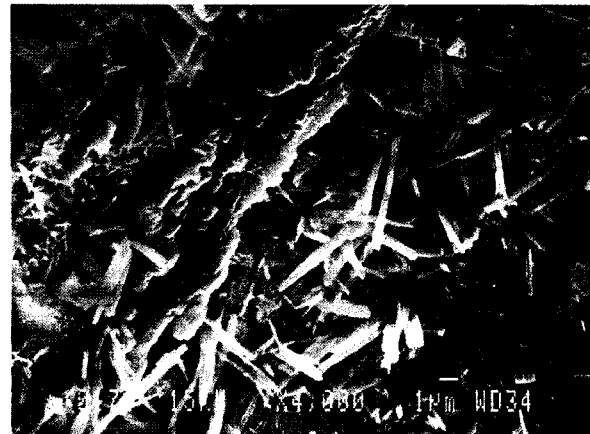


Figure 5.53 Micrographe 32

Ettringite amorphe. Vue rapprochée du micrographe 31 (figure 5.50).

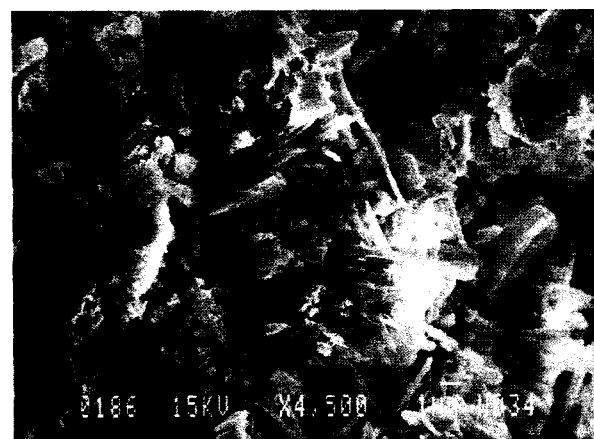


Figure 5.54 Micrographe 33

Ettringite dense et compressée.  
 Vue rapprochée du micrographe 31  
 (figure 5.50).

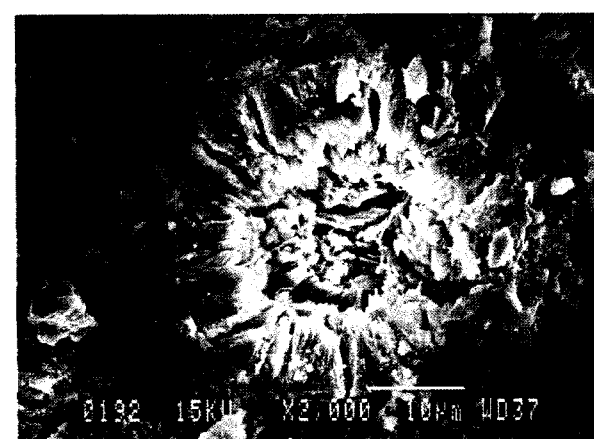


Figure 5.55 Micrographe 34

Bulle d'air remplie d'ettringite  
 comprimée.

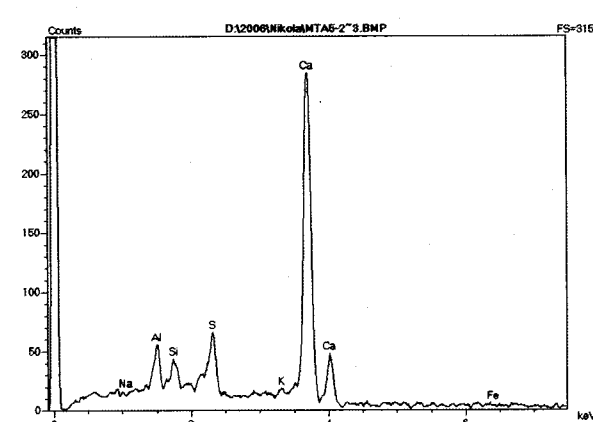


Figure 5.56 Analyse élémentaire 12

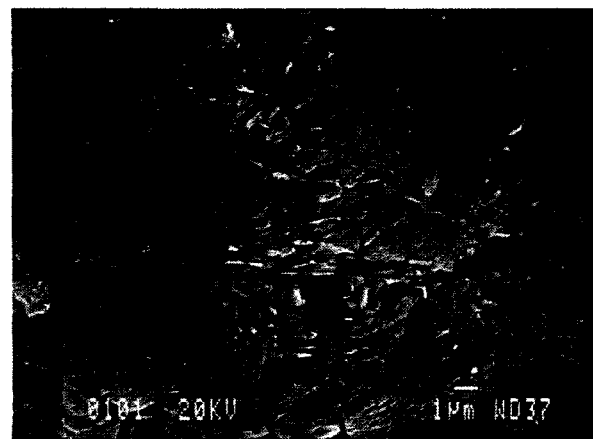
Analyse élémentaire du micrographe  
 34 (figure 5.55).

Les analyses, effectuées sur les échantillons de béton provenant du passage inférieur Masson, montrent une abondance d'ettringite. La fissuration, au travers des dépôts d'ettringite (figures 5.47 à 5.49), est la conséquence du séchage de l'échantillon, nécessaire à sa préparation pour l'analyse au MEB. Contrairement aux échantillons provenant des autres structures, la présence d'ettringite comprimée laisse croire à des signes de formation différée d'ettringite (figures 5.47 et 5.48). Les bulles d'air sont, à certains endroits, complètement remplies par les dépôts d'ettringite (figure 5.55). L'abondance d'ettringite sous toutes ses formes (figures 5.49 et 5.50) et, plus particulièrement, d'ettringite amorphe (figures 5.53 et 5.54), est présente partout dans les échantillons examinés.

Par ailleurs, les figures 5.45 et 5.46 et leurs analyses élémentaires indiquent également une attaque par la carbonatation.

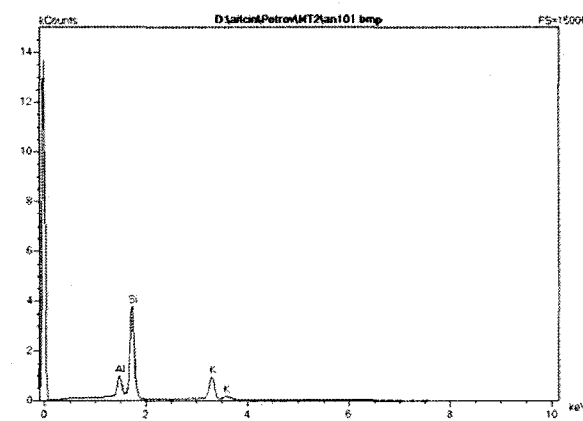
- Passage inférieur Victoria « mur sud »

Au total, cinq échantillons, provenant d'une profondeur de 30 cm environ, ont été analysés. De nombreux micrographes ont été pris, dont plusieurs sont présentés en annexe. Sont ici présentés, seulement les micrographes les plus pertinents. Il est important de rappeler que le passage inférieur Victoria a été construit durant l'hiver et au printemps de l'année 1960. Il est probable que le béton, durant la période de construction, a alors été chauffé, ainsi que l'abri autour du coffrage. Les micrographes suivant présentent les observations générales dans le béton, du mur sud de l'ouvrage.



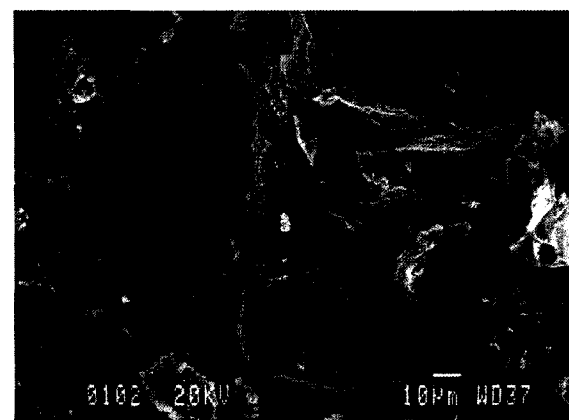
**Figure 5.57** Micrographe 35

Granulat fissuré par la réaction alcalis granulat (RAG)



**Figure 5.58** Analyse élémentaire 13

Analyse élémentaire (micrographe 35, figure 5.57) de la surface des granulats fissurée par la RAG.



**Figure 5.59** Micrographe 36

Interface d'un granulat, avec la pâte fissurée L'espace dans l'interface est vide, montrant qu'il est peu probable que l'ettringite différée soit la cause de la fissuration

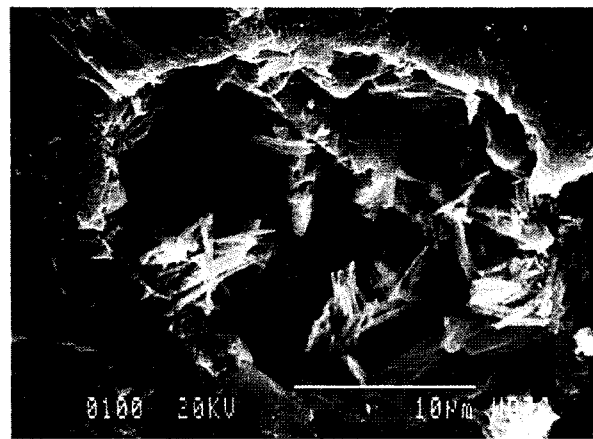


Figure 5.60 Micrographe 37

Ettringite en forme d'aiguille (non expansive) dans une bulle d'air entraîné.

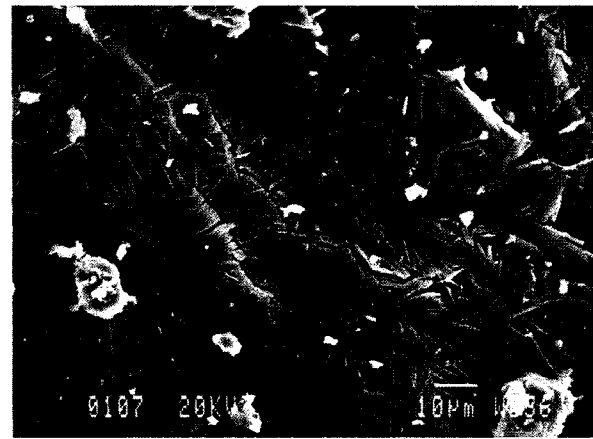


Figure 5.61 Micrographe 38

Dépôt d'ettringite dans l'interface; présente sporadiquement.

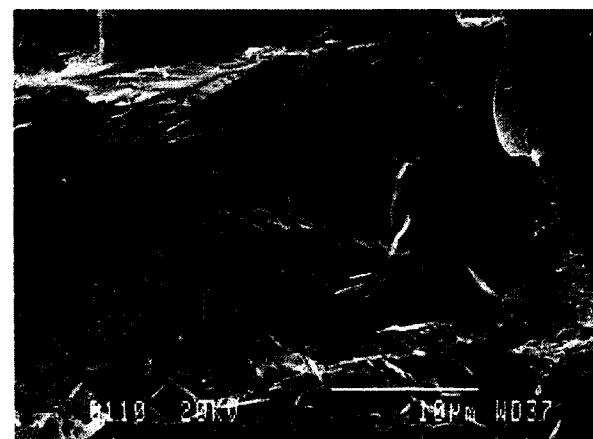
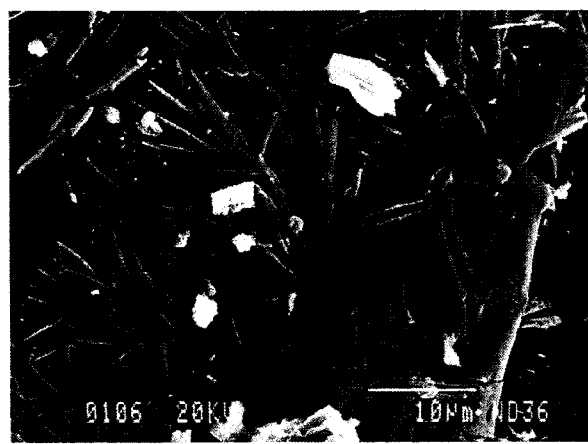


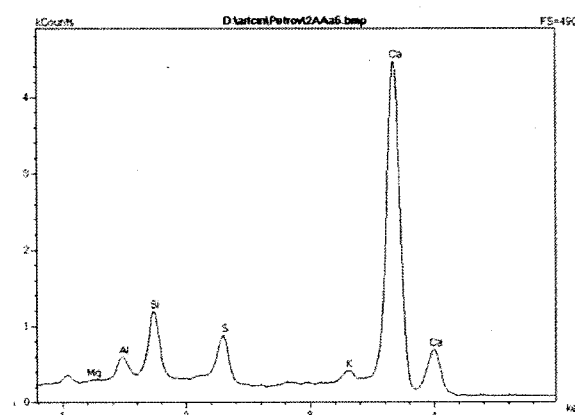
Figure 5.62 Micrographe 39

Dépôt d'ettringite dans l'interface; présente sporadiquement, mais conjointement avec le gel de silice (RAG)



Idem au micrographe 38 (figure 5.61).

**Figure 5.63** Micrographe 40

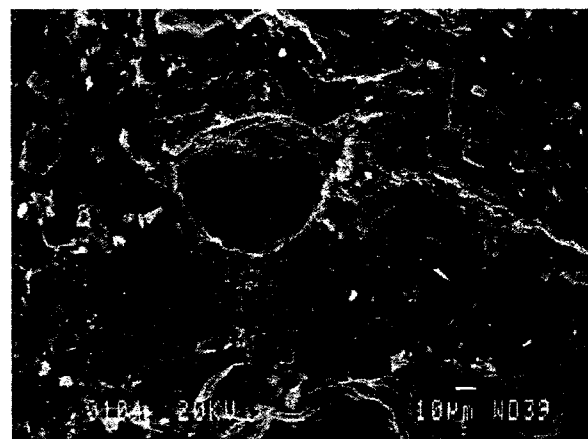


Analyse élémentaire de l'ettringite dans l'interface, présentée au micrographe 40 (figure 5.63).

**Figure 5.64** Analyse élémentaire 14

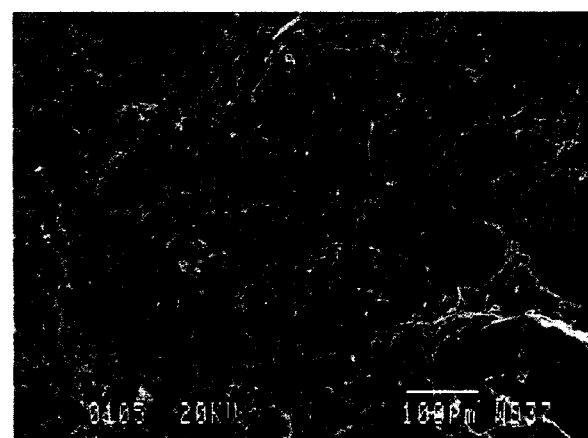
- Passage inférieur Victoria « poteau est »

Deux échantillons, prélevés à partir du « poteau est » du passage inférieur, ont été observés au MEB. Le béton étant en relativement bon état et les premières observations au MEB montrant un béton sain, seul un nombre limité de micrographes et d'analyses élémentaires a été effectué.



**Figure 5.65** Micrographe 41

Pâte fissurée et poreuse. Aucun dépôt d'ettringite dans les bulles d'air entraîné.



**Figure 5.66** Micrographe 42

Idem au micrographe 41 (figure 5.65); grossissement plus faible

L'analyse des échantillons, prélevés à partir du béton du « mur sud », montre la présence sporadique de dépôts d'ettringite dans l'interface des granulats avec la pâte (figures 5.60 à 5.62). Ces dépôts apparaissent conjointement avec le gel de la RAG (figure 5.57). On distingue bien une forme d'ettringite mal cristallisée ou amorphe. Par contre, il n'y a aucune trace d'ettringite dans les interfaces pâte/granulats observées (figure 5.59). De plus, les bulles observées ne sont que partiellement remplies d'ettringite en forme d'aiguille, donc non expansives (figure 5.60). Il est donc peu probable que l'ettringite différée observée soit la cause principale de la fissuration et de la dégradation du béton de la structure.

L'analyse des échantillons, prélevés à partir du béton du « poteau est », ne fait état d'aucun signe d'attaque par les sulfates, ni de la présence de la RAG (figures 5.65 et 5.66). D'ailleurs, les colonnes ont des dimensions beaucoup plus petites que les murs de la culée. Par conséquent, la température du béton, lors des premiers jours suivant sa mise en place, n'a probablement pas été très élevée.

Plusieurs micrographes et analyses sont présentés en annexe.

### **5.3 Conclusion de chapitre**

Tout au long de cette étude, il a été possible de remarquer que le dégagement de chaleur et le développement de température qui s'en est suivi s'explique, non pas par le type, mais par la quantité de ciment utilisé pour la fabrication des cubes, dans le cas des ciments GU et HE. Cette situation s'explique par des compositions chimiques similaires de ces deux types de ciment.

Les essais réalisés semblent indiquer qu'il faut une exposition à une température supérieure à 70 °C pour obtenir une expansion significative.

L'ajout d'adjuvants, source supplémentaire de sulfates, semble accélérer l'amorce de l'expansion.

La variation de la quantité de ciment influence l'expansion, seulement par son influence sur la chaleur d'hydratation et sur la température conséquente.

Des recherches supplémentaires sont requises pour mieux comprendre l'influence des ajouts minéraux sur la formation différée de l'ettringite. En effet, une tendance à l'expansion, sur des prismes fabriqués avec un ciment ternaire, a été observée et ce, même si la température maximale n'avait pas dépassé 60 °C. Cette situation entre en contradiction avec les recherches précédentes.



L'effet bénéfique de l'air entraîné, pour protéger le béton des déformations liées à la formation différée de l'ettringite, est maintenant confirmé. Tout porte à croire que les bétons utilisés pour la construction d'ouvrages, dans les régions ou pays chauds, devraient comporter un minimum d'air entraîné. Il serait ainsi possible d'assurer un meilleur comportement du béton face aux effets de la formation différée de l'ettringite, tout comme on le fait dans les pays nordiques pour limiter les effets du gel et du dégel.

Les résultats obtenus, sur des prismes fabriqués avec le ciment ternaire, n'indiquent pas de déformation, contrairement à ceux obtenus sur le cube M10 fabriqué avec le même ciment. Cette situation confirme que des recherches supplémentaires sont effectivement requises, afin de comprendre l'influence des ajouts minéraux.

À la suite de la collecte d'information et de la lecture des résultats d'analyses des échantillons, pris sur les sept ouvrages, l'on remarque une tendance. En effet, cinq ouvrages ont été réalisés en automne ou même en plein hiver. Pour ces ouvrages, le béton des éléments analysés ne comportait aucune trace d'ettringite formée tardivement ou amorphe. Par contre, pour les deux ouvrages construits en pleine période estivale, la présence d'ettringite formée tardivement a été observée. En effet, dans le cas du passage inférieur Jarry/Querbes, une partie de l'ouvrage semble avoir subi une montée considérable de température, puisque l'on y trouve des traces d'ettringite formée tardivement.

Dans le cas du passage inférieur Masson, contrairement aux autres ouvrages, il y a abondance d'ettringite sous toutes ses formes et, particulièrement, de l'ettringite amorphe, partout dans les échantillons examinés. La présence d'ettringite d'apparence comprimée et amorphe porte à croire à sa formation différée.

## 6 CONCLUSION

Cette étude cherchait à déterminer s'il existe un potentiel, ou un risque réel, d'expansion des bétons causée par la formation différée de l'ettringite, dans le béton coulé *in situ* des ouvrages d'art au Québec. Un tel phénomène pourrait d'ailleurs être une source de désordre causant la fissuration ou, même simplement, une amorce de fissuration ouvrant ainsi la voie aux divers autres mécanismes de détérioration du béton. L'étude cherchait également à déterminer le potentiel de formation différée de l'ettringite dans les bétons fréquemment utilisés pour la construction des sections plus massives des ouvrages d'art.

La formation différée de l'ettringite peut être la cause de désordre dans les bétons coulés en place, dans des éléments massifs, chaque fois que le seuil critique de la température est dépassé, généralement autour de 70 °C. [DIVET, 2001]. Les observations de la formation différée de l'ettringite, lors des analyses au MEB, dans les ouvrages des passages inférieurs Jarry/Querbes et Masson, mettent en évidence l'affirmation précédente. Cela démontre également une grande sensibilité du phénomène (ou de risque) face au dépassement du seuil critique de la température. Plus particulièrement, les échantillons de béton, prélevés sur un mur de la culée du passage inférieur Jarry/Querbes, démontrent qu'à une profondeur de 30 cm de la surface de l'élément, il peut y avoir formation différée d'ettringite. Toutefois, aucune trace n'est visible dans la couche du béton située près de la surface du même élément. Quoiqu'il n'y ait pas d'enregistrement des températures, pour cette structure existante construite il y a 40 ans, il est très probable que le béton situé à 30 cm de la surface avait, lors des premiers jours suivant sa mise en place, une température plus élevée (de quelques degrés) que le béton situé près de la surface. Cette situation aurait ainsi créée des conditions pour la formation différée de l'ettringite. Il est donc évident que la géométrie de l'élément coulé peut avoir une influence importante sur l'atteinte du seuil critique de la température.

Le type de ciment utilisé et la quantité incluse dans le mélange ne sont pas que les seuls facteurs clefs pour éviter d'atteindre le seuil critique. Il a été observé que l'ajout de superplastifiants, à base de sulphonate naphthalin, peut aussi avoir un effet de sensibilité du béton face à la formation différée de l'ettringite. Les mesures effectuées sur des prismes, soumis à des cycles thermiques sous l'eau, ont permis de constater la sensibilité des systèmes

cimentaires, face à la formation différée de l'ettringite. Cette méthode permet d'amorcer plus rapidement l'expansion lorsqu'un béton est potentiellement sensible à la formation différée de l'ettringite.

Il a également été observé que l'utilisation d'un ciment contenant des ajouts minéraux (ciment ternaire : 22 % de cendres volantes, 4 % de fumée de silice), diminue grandement le risque de la formation différée de l'ettringite et de l'expansion qui s'en suit. Dans le cas étudié sur les cubes, ce comportement peut être attribué au fait que la température développée par la chaleur d'hydratation du ciment ternaire est moins élevée que celle développée par un ciment Portland (type GU). Par contre, même lorsqu'un béton, fabriqué à partir d'un ciment ternaire, est traité thermiquement à 80 °C (soumis au même régime de cure accélérée, tout comme les autres bétons étudiés et conçus avec un ciment GU), une absence d'expansion est évidente. Il est possible que pour un tel système cimentaire, le seuil thermique critique soit au-delà de 80 °C. Il est aussi possible que la consommation de la chaux (portlandite), par les ajouts minéraux qui créent plus de C-S-H, permette à la pâte d'absorber plus d'ions  $SO_4^{2-}$ , comparativement à une pâte contenant de la portlandite.

Il est possible de croire que des travaux supplémentaires sont requis pour mieux comprendre l'influence des ajouts sur la sensibilité d'un système cimentaire puisqu'une expansion, de 750  $\mu\text{m/m}$  après 1400 jours, a été mesurée sur des prismes fabriqués avec le mélange M10 (ternaire). Également, si la température maximale, au cœur du cube fabriqué avec ce mélange, avait dépassé 70 °C, l'expansion aurait peut-être été plus significative. Cette situation, comme il a été possible de l'observer, est en désaccord avec la recherche précédente [PETROV, 2004] qui prétend que les ajouts minéraux assurent une protection contre l'expansion causée par la formation différée de l'ettringite. Des recherches supplémentaires, davantage axées sur l'influence des ajouts minéraux sur la formation différée de l'ettringite, seraient donc nécessaires.

Il est donc possible de conclure qu'il existe un potentiel, ou un risque, d'expansion des bétons causée par la formation différée de l'ettringite, dans des bétons existants, coulés *in situ*. Ainsi nous croyons que les concepteurs doivent se soucier, non seulement de la géométrie des ouvrages, mais aussi du type de liant et des ajouts utilisés dans le mélange de béton, pour

éviter d'atteindre des chaleurs d'hydratation, au-delà du seuil de 70 °C. Il y aurait aussi lieu de se questionner sur la pertinence de fabriquer des ciments présentant des finesses de plus en plus élevées. En effet, pour répondre aux exigences des acheteurs, les fabricants de béton utilisent de plus en plus des ciments à finesse Blaine élevée, afin de permettre une cadence plus élevée en chantier. L'augmentation de la vitesse de prise est justifiable, dans un contexte où le rendement est important. Toutefois, il devrait être limité, sinon interdit d'utilisation, pour la construction d'éléments massifs, toujours dans le but de limiter le développement d'une température élevée du béton.

Ainsi, les risques associés à la formation différée de l'ettringite seront grandement limités.

## RÉFÉRENCES

- AÏTCIN, P.-C. (2001) *Le ciment du béton* note du cours *Les liants hydrauliques*, 2001.
- AÏTCIN, P.-C. (2000) *High-Performance Concrete*, ed. E and FN Spon, 1998, 591 p.
- AÏTCIN, P.-C. (1998) *Béton à haute performances*, Eyrolles, 683 p.
- AKMAN, M.S., GÜLSEREN, H. (1994) *The Influence of Heat Treatment on the Durability of Concrete*, Proceedings Third Canmet – ACI International Conference, Nice, France, p. 1051-1066.
- AMAFUJI, M., TSUMAGARI, A. (1969) *A Formation of Double Salt in Cement Burning*, Proceedings 5<sup>th</sup> Inter. Symp. Chem. Cement, Tokyo, vol. 1, p. 136-156.
- ASTM C150 (2001) *Standard Specification for Portland Cement*, Annual Book of ASTM Standards, vol. 04.01.
- CSA A23.1, *Béton : Constituants et execution des travaux / Méthodes d'essai et pratiques normalisées pour le béton*.
- CSA A3000-03, (2003) *Cementitious Materials Compendium*, CSA.
- CSA A23.4, (2000) *Precast Concrete – Materials and Construction / Code for Architectural and Structural Precast Concrete Products*, CSA International.
- COLLEPARDI, M. (janvier 1999) *Damage by Delayed Ettringite Formation*, Concrete International, p. 69-74.
- DAY, R.L. (1992) *The Effect of Secondary Ettringite Formation on the Durability of Concrete: A Literature Analysis*, Portland Cement Association, 115 p.
- DIAMOND, S., ONG, S. (1992) *Combined Effects of Alkali Silica Reaction and Secondary Ettringite Deposition in Steam Cured Mortars*, Cement Technology, vol. 40, p. 79-90.
- DIAMOND, S., ONG, S., BONEN, D. (April 1994), *Characteristics of Secondary Ettringite Deposited in Steam Cured Concretes Undergoing ASR*, Proceedings of the Sixteenth International Conference on Cement Microscopy, Richmond, Virginia, USA, p. 294-305.
- DIAMOND, S. (juin 1996) *Delayed Ettringite Formation – Processes and Problems*, Cement and Concrete Composites, vol.18, p. 205-215.
- DIVET, L., RANDRIAMBOLOLONA, R. (1998) *Delayed Ettringite Formation : The Effect of Temperature and Basicity on the Interaction of Sulfate and C-S-H Phase*, Cement and Concrete Research, vol. 28, n° 3, p. 375-363.
- DIVET, L. (2001) *Les réactions sulfatiques internes au béton : contribution à l'étude des mécanismes de la formation différée de l'ettringite*, Laboratoire Centrale des Ponts et Chaussées, Ouvrage d'art OA 40, 227 p.
- ECSC, *European Committee for Standardization, Concrete – Performance, Production, Placing and Compliance Criteria*.
- FAMY, C. (1999) *Expansion of Heat-cured Mortars*, Doctor of Philosophy Thesis, University of London, 256 p.

- FU, Y., XIE, P., GU, P., BEAUDOIN, J.J. (1994) *Significance of Pre-Existing Cracks on Nucleation of Secondary Ettringite in Steam Cured Cement Paste*, Cement and Concrete Research, vol. 24, n° 6, p. 1015-1024.
- FU, Y., BEAUDOIN J.J. (1996b) *Microcracking as a Precursor to Delayed Ettringite Formation in Cement Systems*, Cement and Concrete Research, vol. 26, n° 10, p. 1493-1498.
- GCRC, (septembre 1989) *German Committee for Reinforced Concrete, Recommendation on the Heat Treatment of Concrete*, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Deutsches Institut für Normung e.b. Bindsalle 216/218, D-1000 Berlin 15, p.13.
- GHORAB, H.Y. (1999) *Review of Ettringite – Monophase Relationships in Portland Cement Systems*, Ettringite the Sometimes Host of Destruction, ACI International, SP 177-5, p.65-79.
- GHORAB, H.Y., HEINZ, D., LUDWIG, U., MESKHENDAHL, T., WOLTER, A. (1980) *On the Stability of Calcium Aluminate Sulfate Hydrates in Pore Systems and in Cements*, Proc. 7<sup>th</sup> Int. Congr. Chem. Cem. Paris, vol. IV, p.496-503.
- GOLLOP, R.S. et TAYLOR, H.F.W. (1999) *Microstructural and microanalytical studies of sulfate attack in ordinary cement paste*, Cement and Concrete Research, vol. 22, p. 1027-1038.
- GRATTAN-BELLEW, P.E., BEAUDOIN, J.J., VALLÉE, V-G. (1998) *Delayed Ettringite Formation; Effect of Clinker Particle Size and Composition on Expansion of Mortar Bars*, Materials Science of Concrete, ed. the Sydney Diamond Symposium, p. 295-307.
- GUINIER, A., REGOURD, M. (1968) *Structure of Portland Cement Minerals*, Principal Paper in Proc. 5<sup>th</sup> Inter. Symp. Chem. Cement, Tokyo, vol. 1, 1969, p. 1-43.
- HANSON, J.A. (1965) *Optimum Steam Curing Procedures for Structural Lightweight Concrete*, J. Amer. Conc. Inst. vol. 62, p. 661-672.
- HEINZ, D., KALDE, M., LUDWIG, U., RUEDIGER, I. (1999) *Present State of Investigation on Damaging Late Ettringite Formation (DLEF) in Mortars and Concretes*, in Ettringite the Sometimes Host of Destruction, ACI International, SP 177-1, p. 1-14.
- HIME, W.G. (1996) *Clinker Sulfate: a Cause for Distress and a Need for Specification*, Concrete for Environment Enhancement and Protection (Ed. R.K. Dhir and T.D. Dyer) E&FN Spon, London, p. 387-395.
- HIME, W.G., MARUSIN, S.L. (1999) *Delayed Ettringite Formation: many Questions and Some Answers*, Ettringite the Sometimes Host of Destruction, ACI International, SP 177-13, p. 199-206.
- HOBBS, D.W. (1999) *Expansion and Cracking in Concrete Associated with Delayed Ettringite Formation*, Ettringite the Sometimes Host of Destruction, ACI International, SP 177-11, p. 159-181.
- JOHANSEN, V., THAULOW, N. (1999) *Heat Curing and Late Formation of Ettringite*, Ettringite the Sometimes Host of Destruction, ACI International, SP 177-1, p. 47-64.
- JONES, T.N., POOLE, A.B. (1987) *Alkali Silica Reactions in Several U.K. Concretes: the Effect of Temperature and Humidity on Expansion and the Significance of Ettringite Development*, Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Alkali Aggregate Reactions (Ed. P.E. Grattan-Bellew) Ottawa, Noyes Publications, Park Ridge, NJ, 1987, p. 446-450.

- KELHAM, S. (juin 1996) *The Effect of Cement Composition and Fineness on Expansion Associated with Delayed Ettringite*, Cement and Concrete Composites, vol. 18, p. 171-179.
- KELHAM, S. (1999) *Influence of Cement Composition on Volume Stability of Mortar*, Ettringite the Sometimes Host of Destruction, ACI International, SP 177-3, p. 27-45.
- KJELSEN, K.O. (1992) *Reaction Kinetics of Portland Cement Mortars Hydrated at Different Temperatures*, Cement and Concrete Research, vol. 22, n° 1, p. 112-120.
- KURDOWSKI, W. (août 2002) *Role of Delayed Release of Sulphates From Clinker in DEF*, Cement and Concrete Research, vol. 32, n° 8, p.401-407.
- LAWRENCE, C.D. (avril 1995), *Mortar Expansions Due to Delayed Ettringite Formation. Effects of Curing Period and Temperature*, Cement and Concrete Research, vol. 25, n° 4, p. 903-914.
- LAWRENCE, B.L., MYERS, J.J., CARRASQUILLO, R.L. (1999) *Premature Concrete Deterioration in Texas Department of Transportation Precast Elements*, Ettringite the Sometimes Host of Destruction, ACI International, SP 177-10, p. 141-158.
- LERCH, W. (novembre 1945) *Effect of SO<sub>3</sub> Content of Cement on Durability of Concrete*, Portland Cement Association, Chicago, Publication Serial n° 0285.
- MARUSIN, S.L., HIME, W.G. (1997) *Concrete and Delayed Ettringite Formation – Causes, Development and Case Studies*, Supplementary Papers of the 4<sup>th</sup> CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, Sydney, Australia, p. 1-12.
- MATHER, B. (juin 2000) *Sulphate Attack on Hydraulic-Cement Concrete*, Fifth International Conference on Durability of Concrete, Barcelona, Spain, p. 13-23.
- MEHTA, P.K., KLEIN, A. (1966) *Investigations on the Hydration Products in the System 4CaO · 3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> · SO<sub>3</sub> - CaSO<sub>4</sub> - CaO - H<sub>2</sub>O*, Symposium on Structure of Portland Cement Paste and Concrete, HRB Special Report 90, Highway Research Board, Washington, D.C., p. 328-352.
- MEHTA, P.K. (1973) *Mechanism of Expansion Associated with Ettringite Formation*, Cement and Concrete Research, vol. 3, p. 1-6.
- MEHTA, P.K. (octobre 1994) *Influence of Microstructure of Concrete on Durability*, Conference in Tribute to Micheline Moranville Regourd, Sherbrooke, Canada.
- MICHAUD, V., SUDERMAN, R. (1999) *Solubility of Sulfates in High SO<sub>3</sub> Clinkers*, Ettringite the Sometimes Host of Destruction, ACI International, SP 177-2, p. 15-26.
- MORANVILLE, M. (automne 1995) *Implications of Curing Temperatures for Durability of Cement-Based Systems, Curing Temperatures and Durability*, Materials Research Society, Seminar on Mechanism of Chemical Degradation of Cement – Based Systems, p. 1-8.
- NEVILLE, A.M. (1998) *Properties of Concrete*, Fourth Edition, British Library Cataloguing in Publication Data, 844 p.
- ODLER, I., GASSER, M. (novembre 1988) *Mechanism of Sulfate Expansion in Hydrated Portland Cement*, Journal of the American Ceramic Society, vol. 71, n° 11, p. 1015-1020.
- PETROV, N. (2004) *Effets combinés de différents facteurs sur l'expansion des bétons causée par la formation différée de l'ettringite*, Ph.D. Thèse, Université de Sherbrooke, Sherbrooke (Québec).

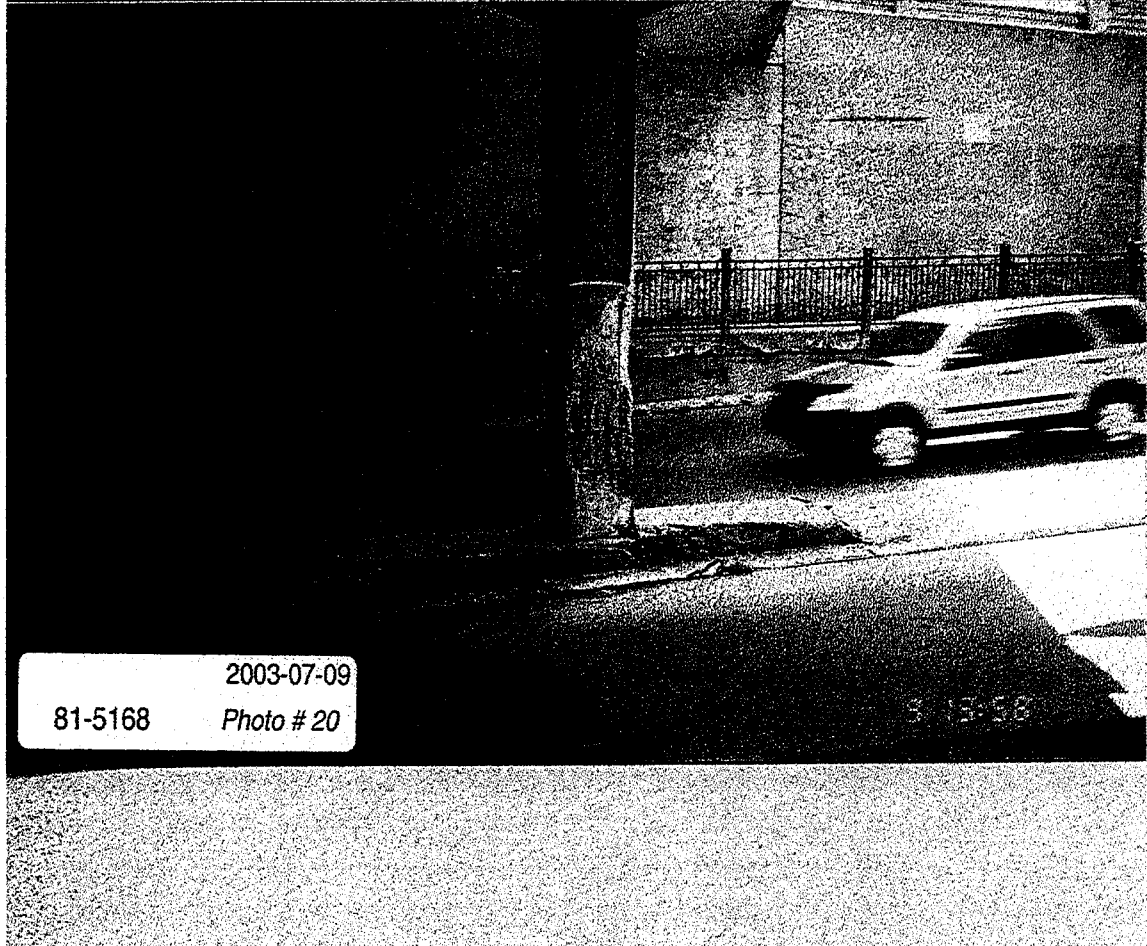
- PETROV, N., MORIN, R., BONNEAU, O., and AÏTCIN, P.-C., (2000) *In-situ Shrinkage in High-Performance Concrete Structures*, Shrinkage 2000, International RILEM Workshop on Shrinkage of Concrete, Paris, France, 16-17 October, 16 p.
- POLLITT, H.W.W., BROWN, A.W. (1969) *The Distribution of Alkalis in Portland Cement Clinker*, Proc. 5<sup>th</sup> Inter. Symp. Chem. Cement, Tokyo, vol. 1, p. 322-333.
- SCRIVENER, K.L. (avril 1996) *Delayed Ettringite Formation and Concrete Railroad Ties*, ICMA, Houston, Texas, USA, p. 375-377.
- SHAYAN, A., QUICK, W.G., LANCUCKI, C.J. (1993) *Morphological, Mineralogical and Chemical Features of Steam-Cured Concretes Containing Densified Silica Fume and Various Alkali Levels*, Advances in Cement Research, vol. 5. n° 20. p. 151-162.
- SHAYAN, A., IVANUSEC, I. (juin 1996) *An Experimental Clarification of the Association of Delayed Ettringite Formation with Alkali-Aggregate Reaction*, Cement and Concrete Composites, vol.18, p. 161-170.
- TAGNIT-HAMOU, A. and PETROV, N. (2004) *A New Method for Evaluating the Risk of DEF*, Cement, Concrete, and Aggregates, vol. 26, n° 2, pp. 52-57.
- TAYLOR, H.F.W. (1993b) *Sulfate Reactions in Concrete – Microstructural and Chemical Aspects*, Cement Technology, vol. 40, p. 61-78.
- THOMAS, M.D.A. (juin 2000) *Ambient Temperature DEF: Weighing the Evidence*, Fifth International Conference on Durability of Concrete, Barcelone, Spain, p. 43-55.



**ANNEXES**

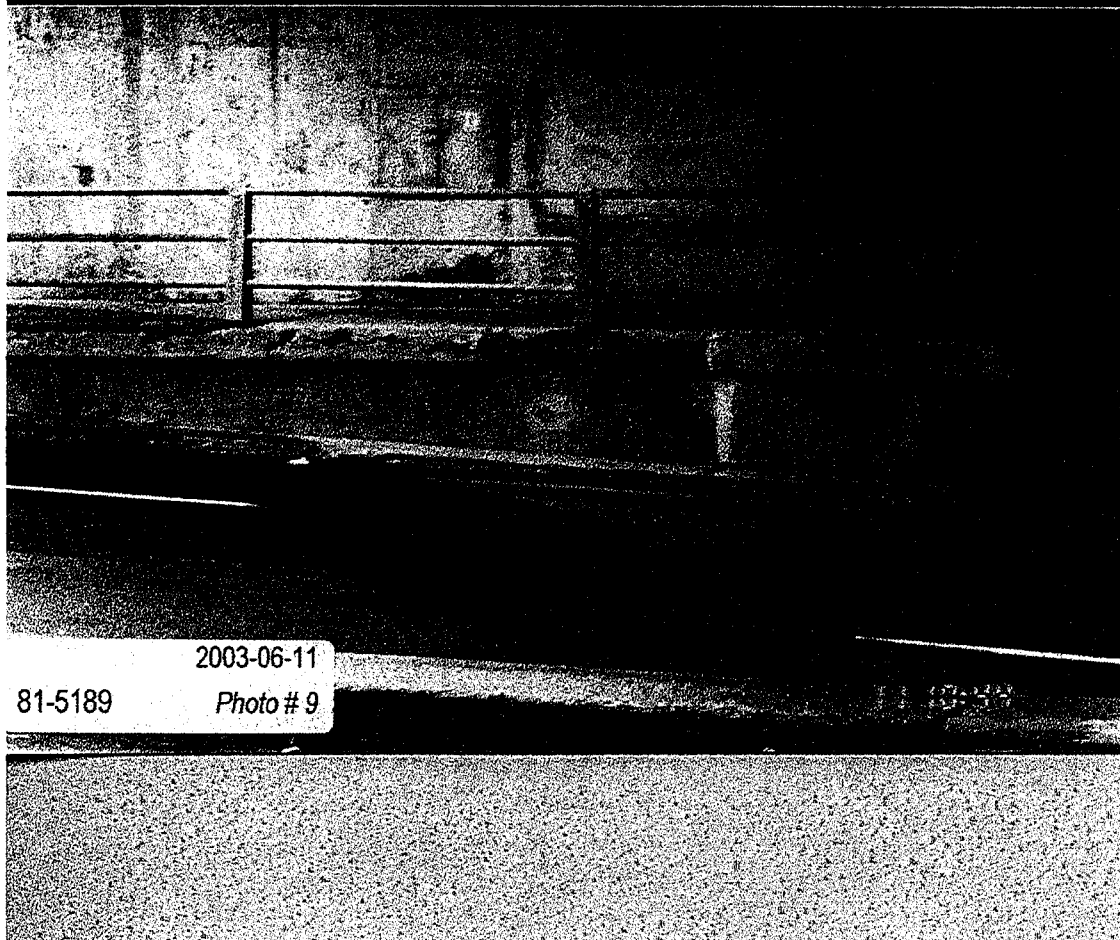
**Localisation des échantillons *in situ***



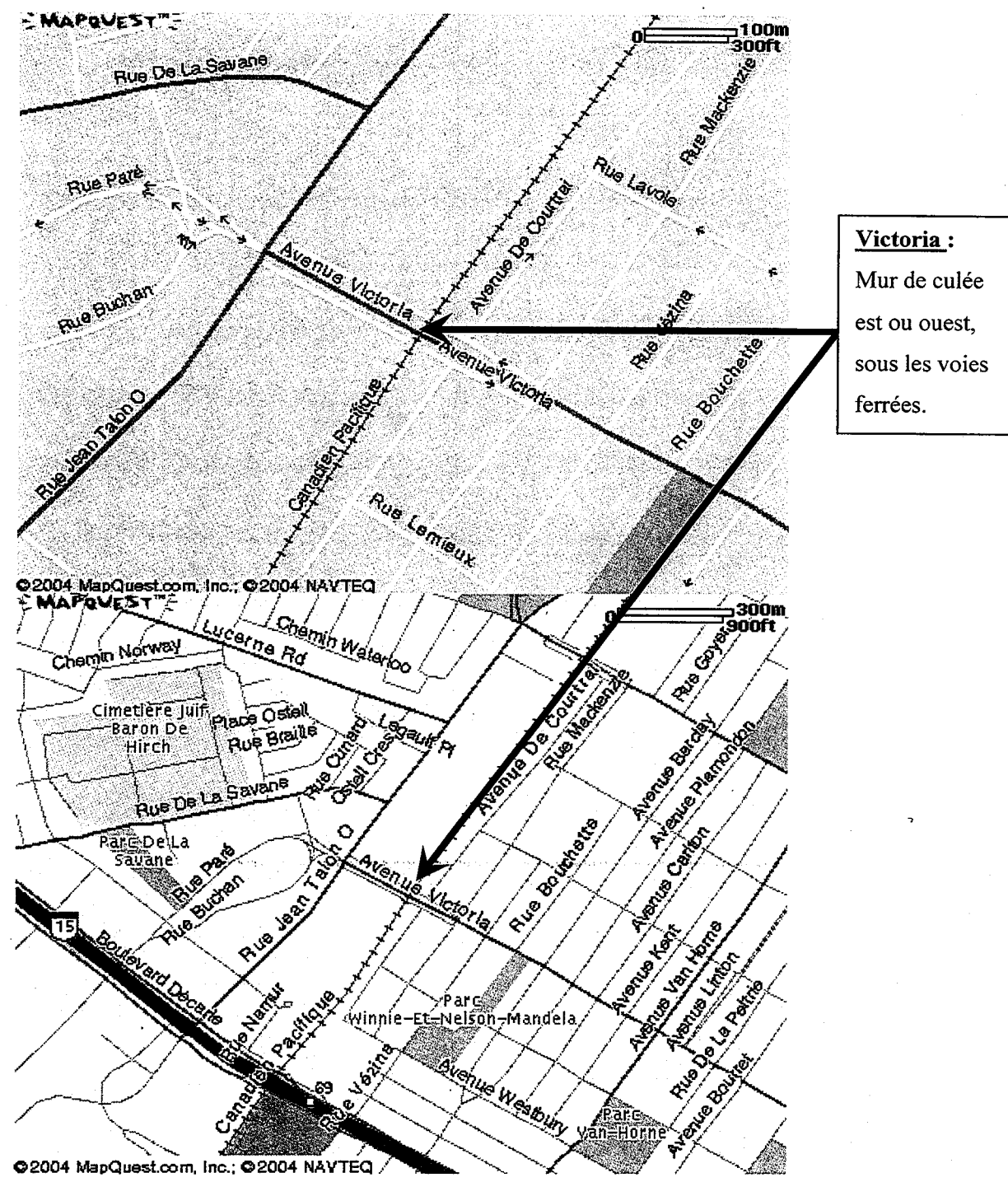




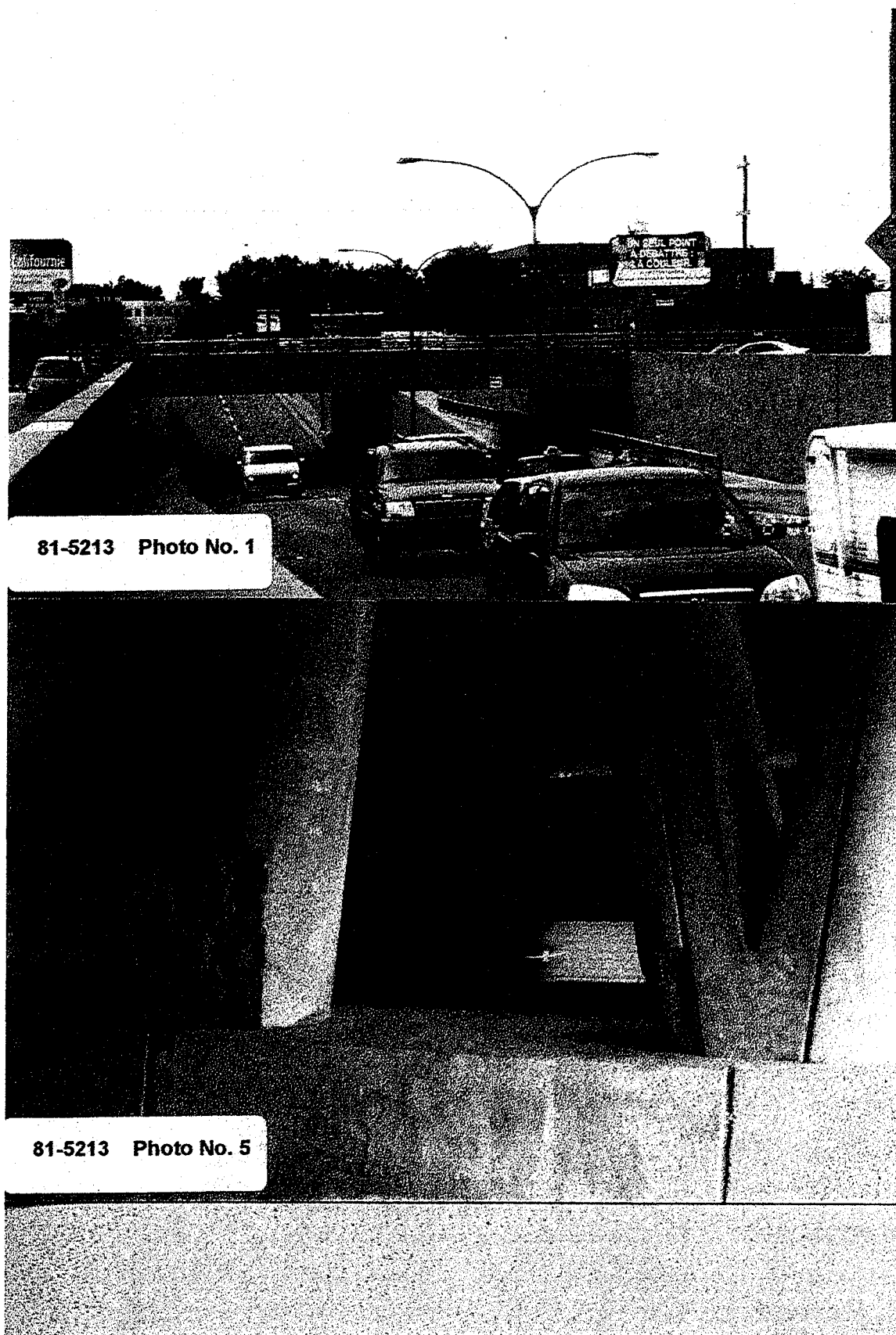




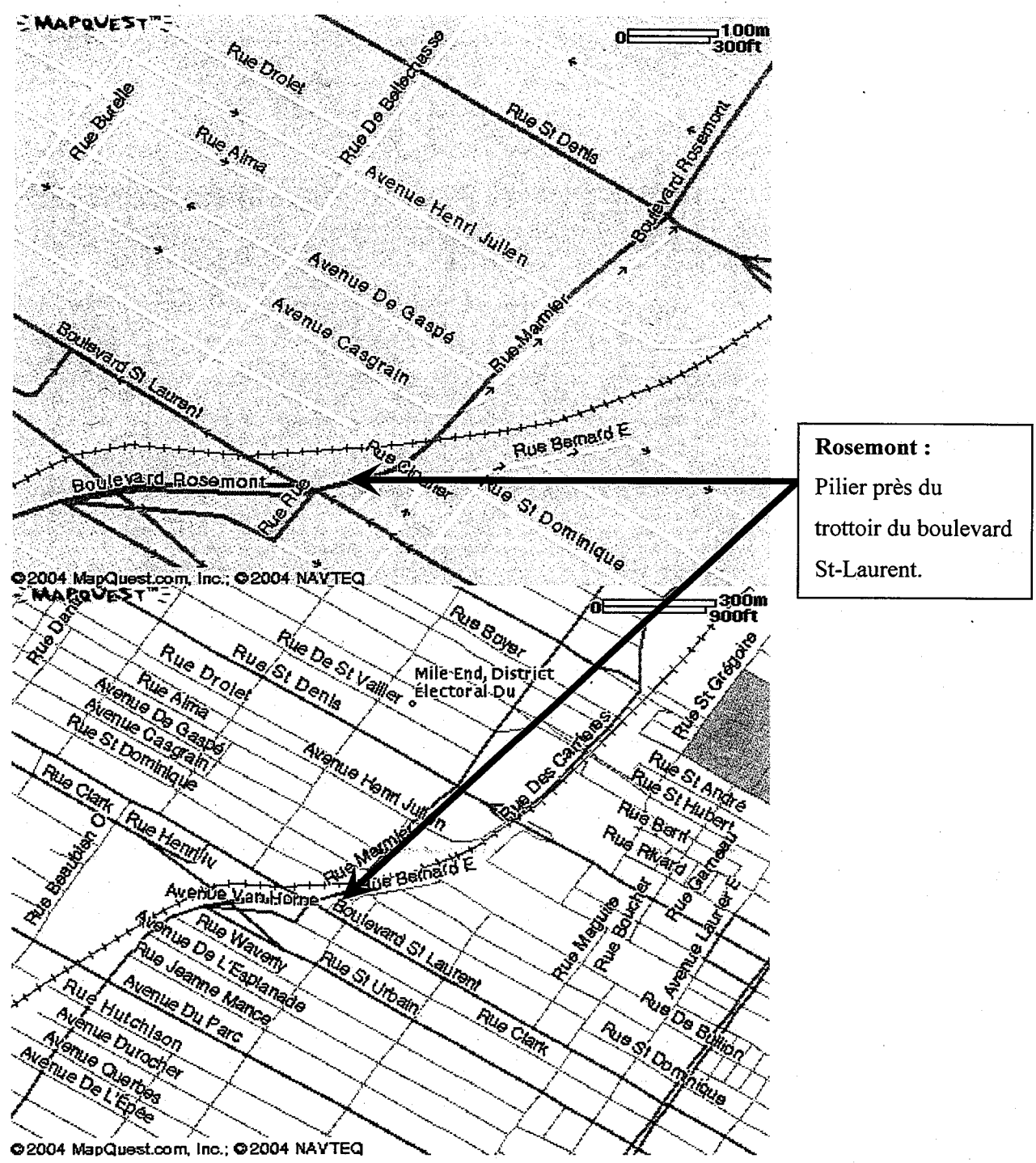
#### 4. Passage inférieur Victoria

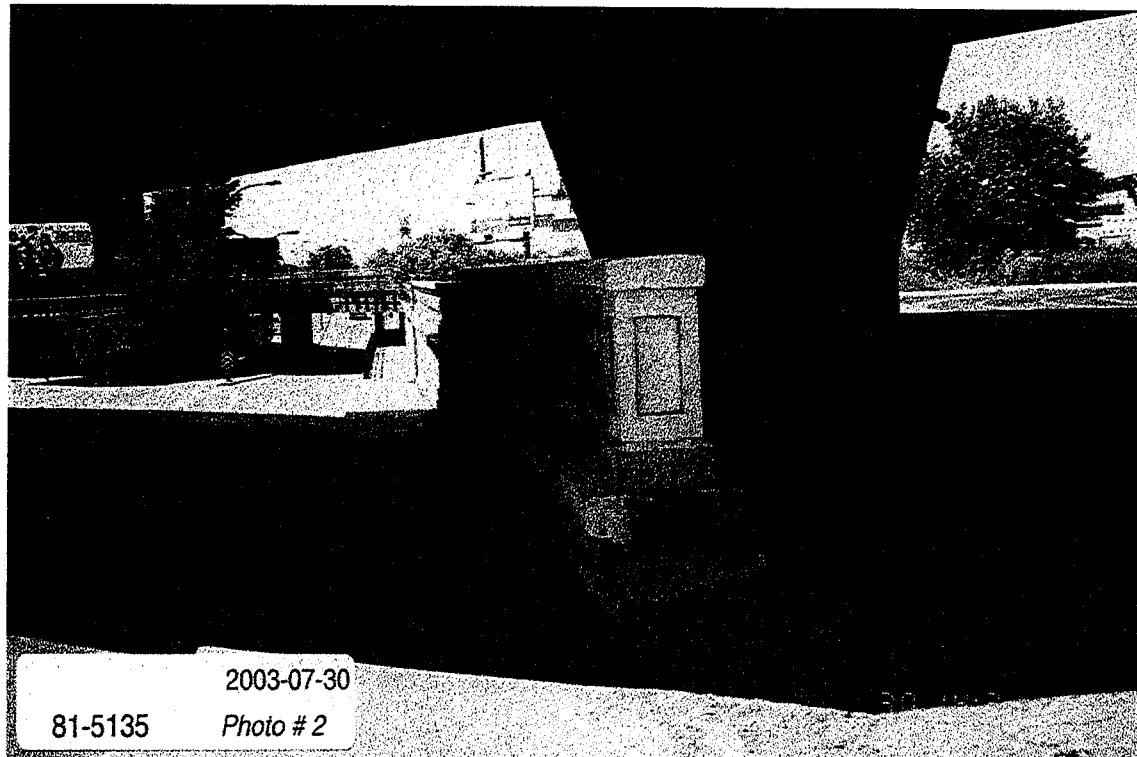




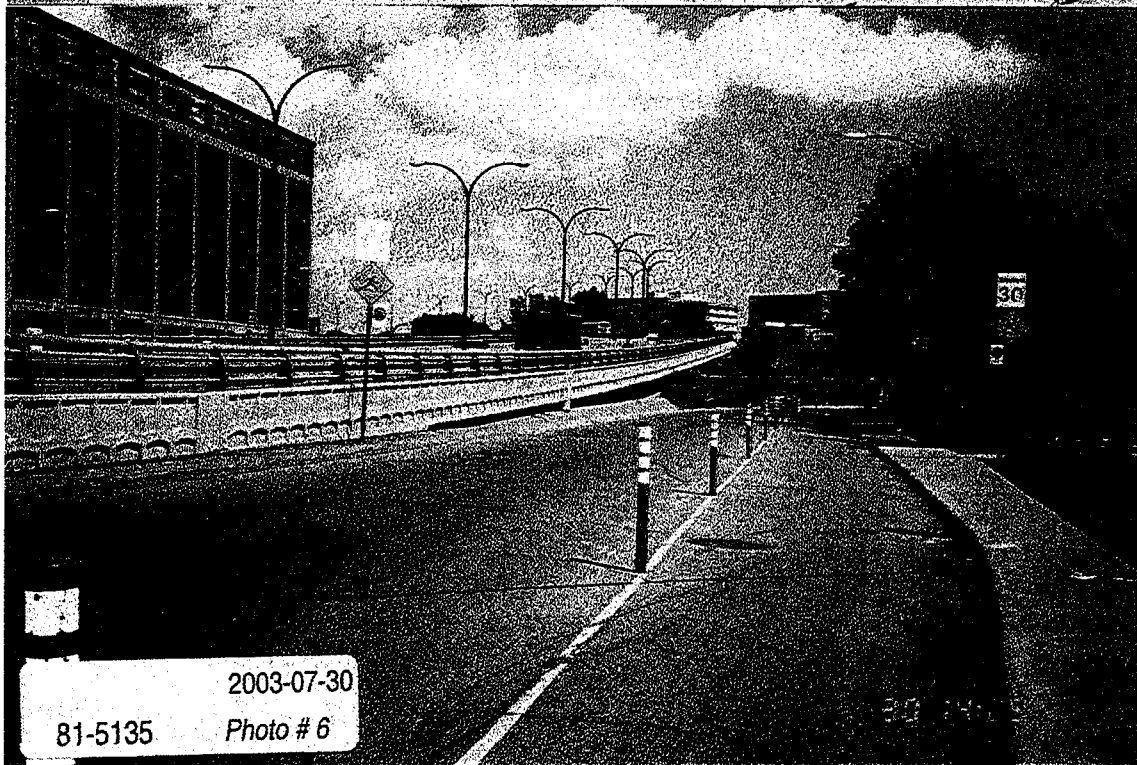


5. Passage supérieur Rosemont/Van Horne



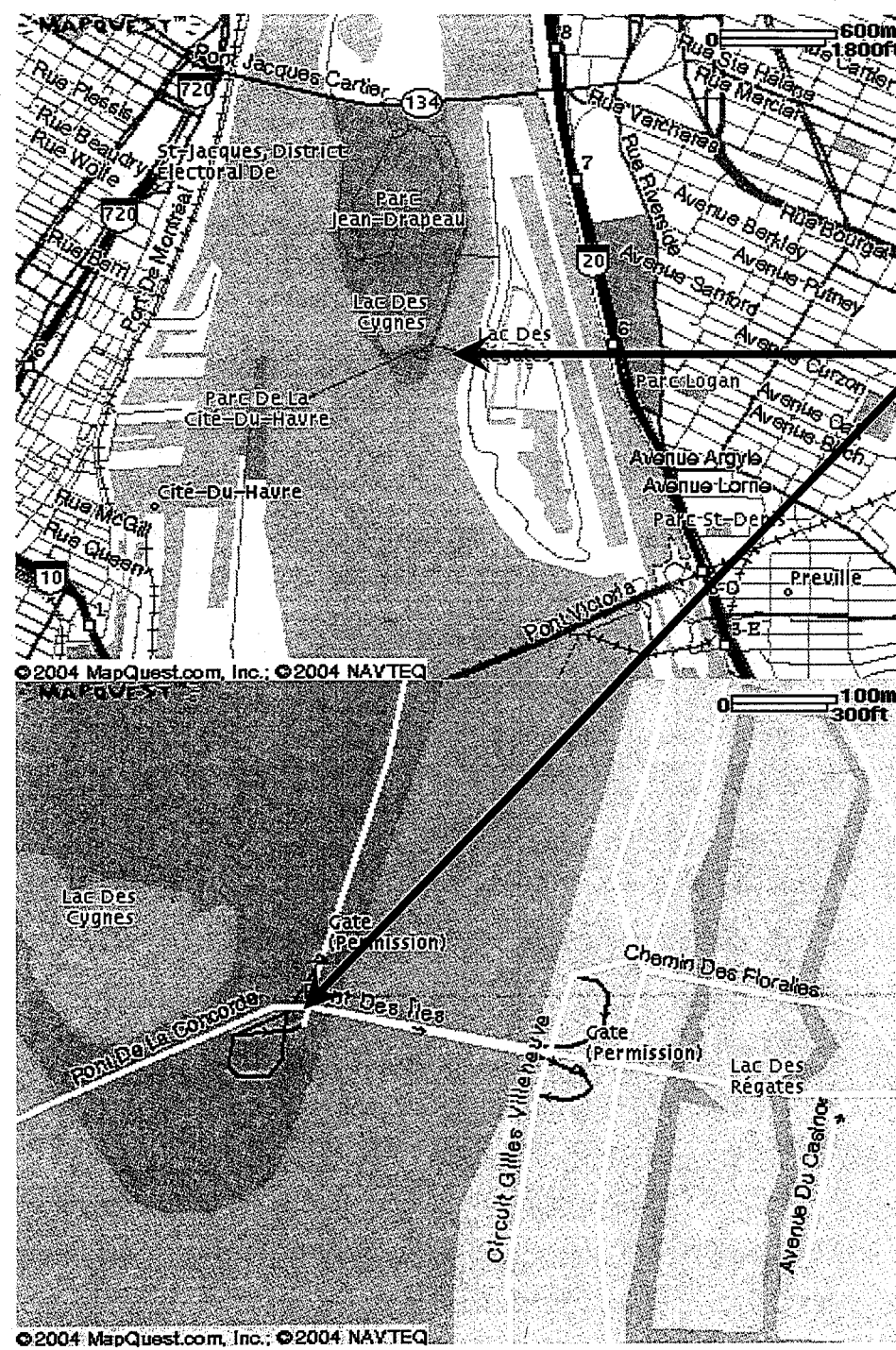


2003-07-30  
81-5135 Photo # 2

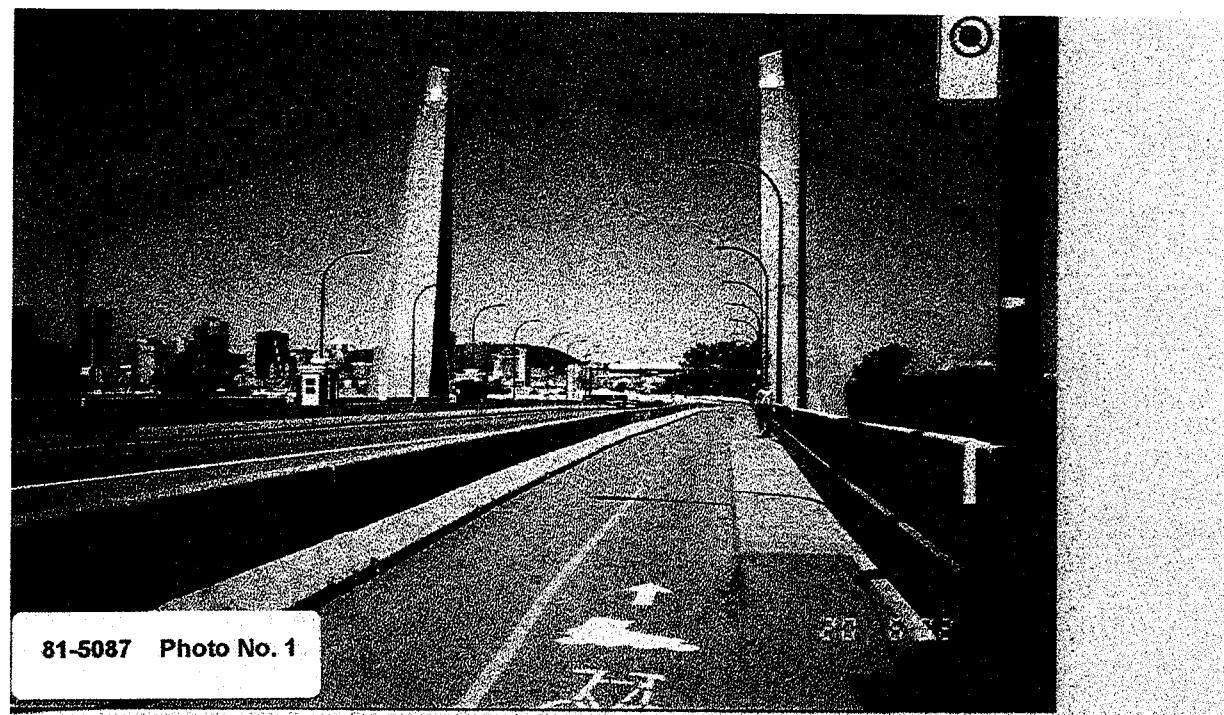


2003-07-30  
81-5135 Photo # 6

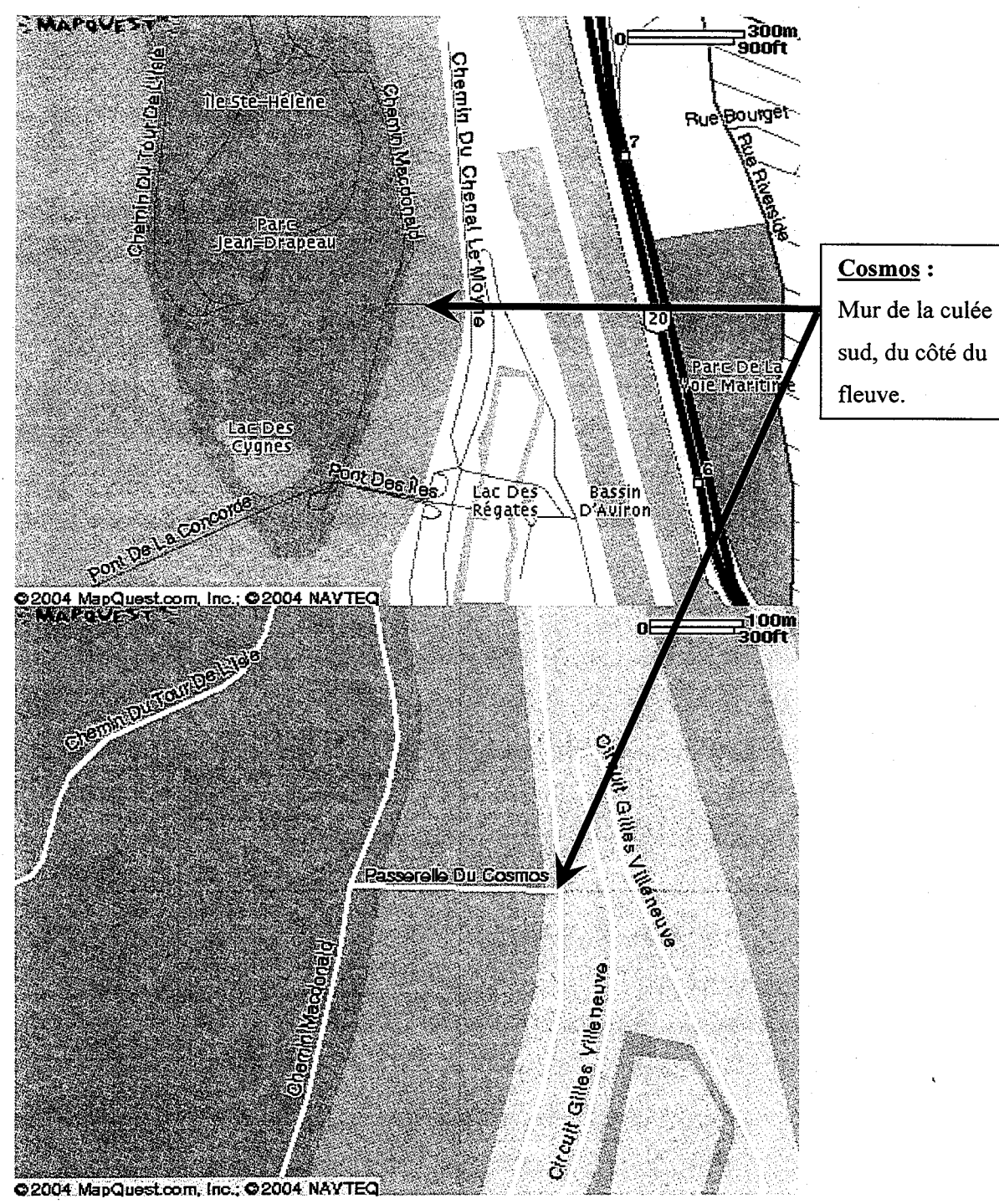
6. Pont des Îles

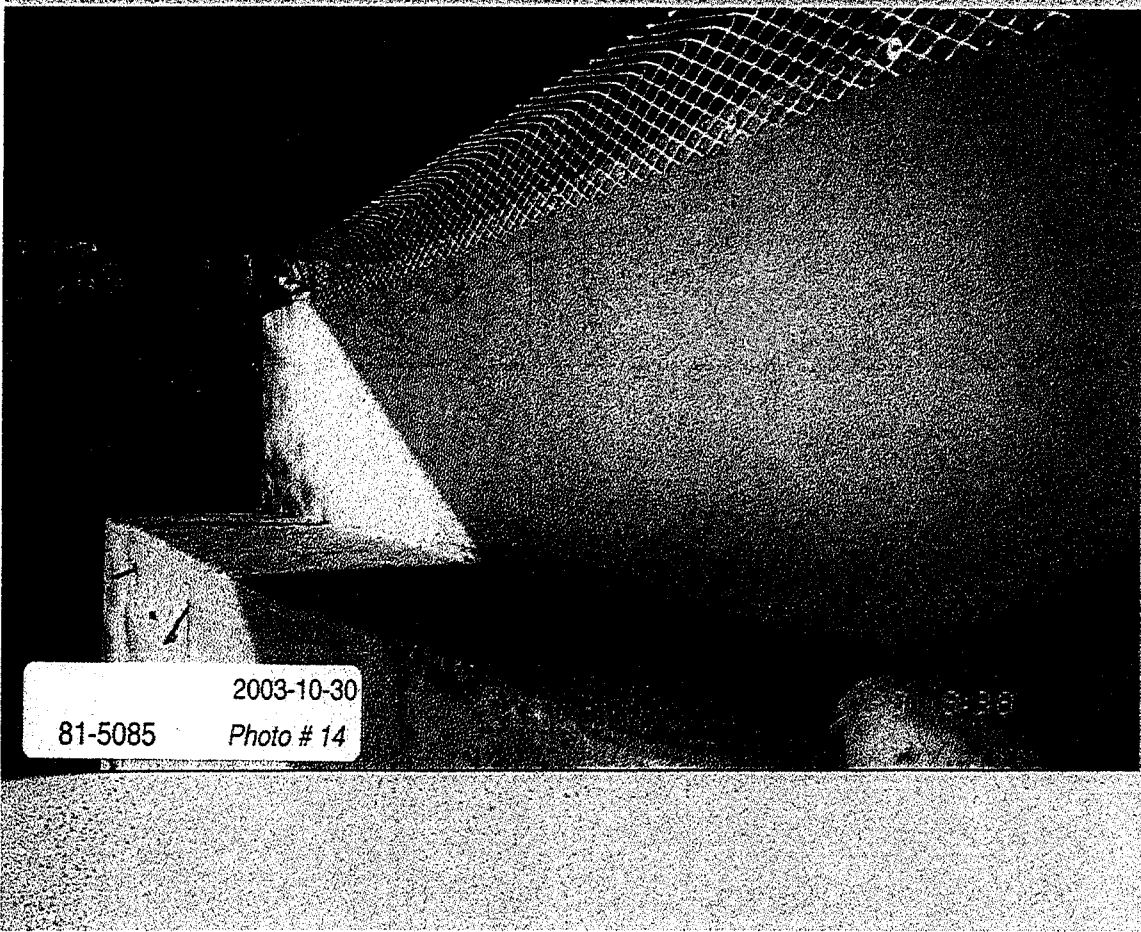
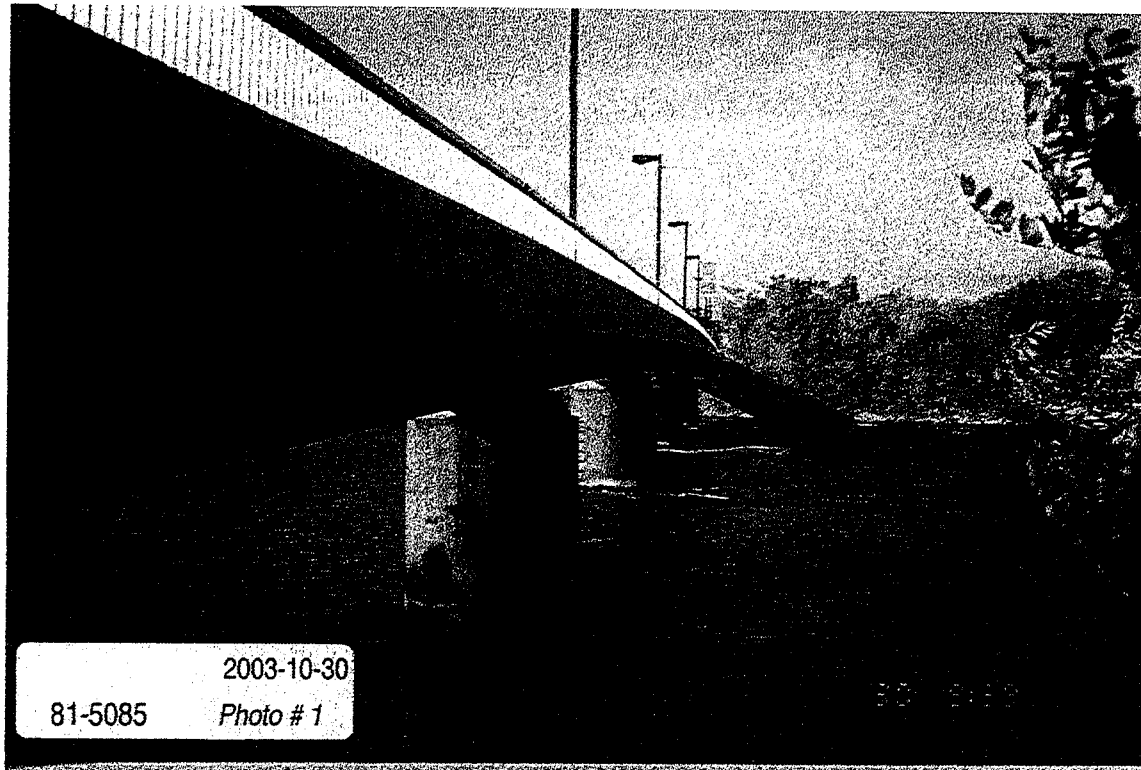


**Pont des Îles :**  
Mur de la culée  
nord, du côté de  
la rue ou une des  
deux colonnes  
du pilier central.



7. Pont du Cosmos

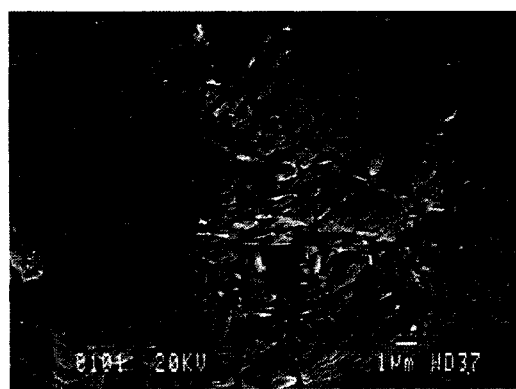




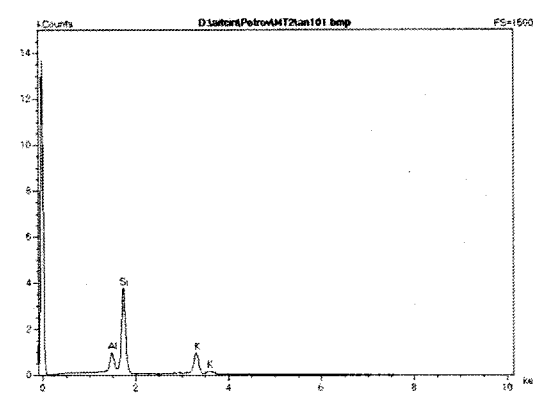
**Analyse des échantillons des bétons *in situ***



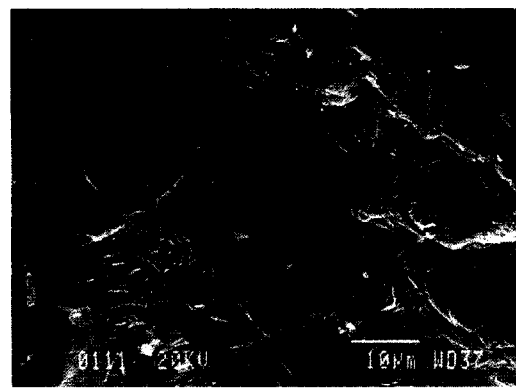
8. Passage inférieur Victoria, « mur sud »



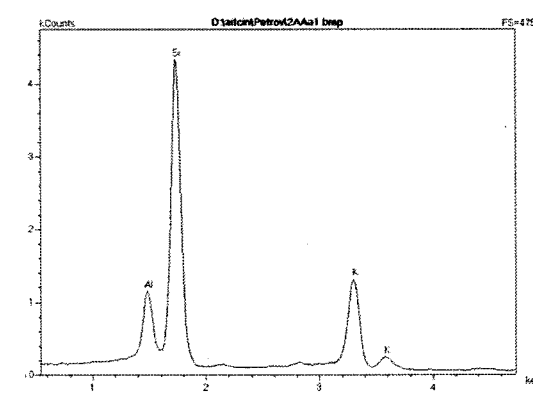
Micrographe A1- Granulat fissuré par la réaction alcalis/granulats (RAG).



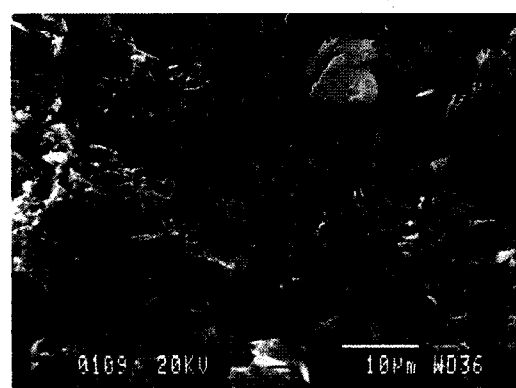
Analyse élémentaire de la surface des granulats, fissurée par la RAG (A1).



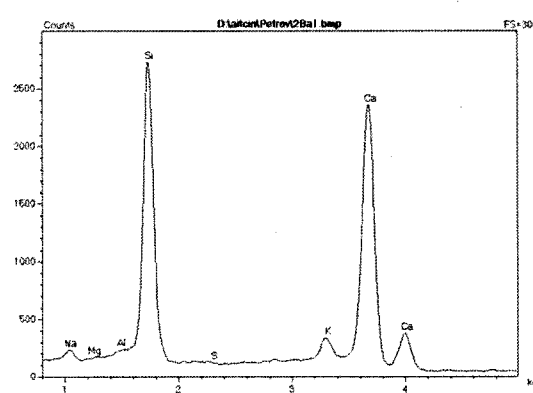
Micrographe A2- Idem au micrographe 5.



Analyse élémentaire du gel, présenté au micrographe A2.

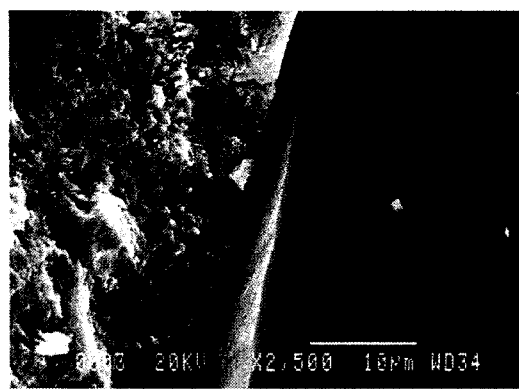


Micrographe A3- C-S-H hétérogènes.

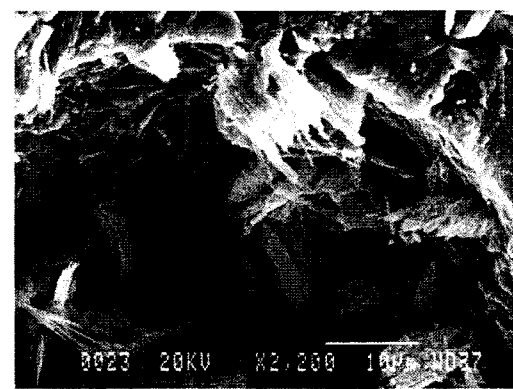


Analyse élémentaire des C-S-H présentés au micrographe A3.

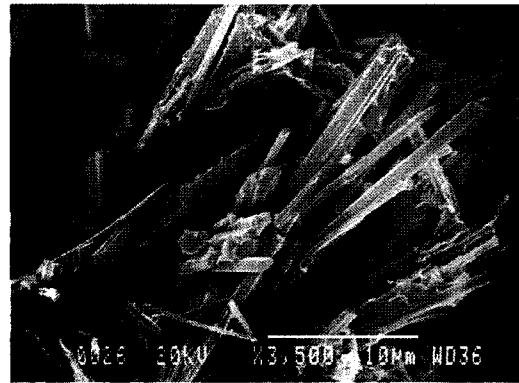
9. Passage inférieur Jarry/Querbes, « échantillon 1 »



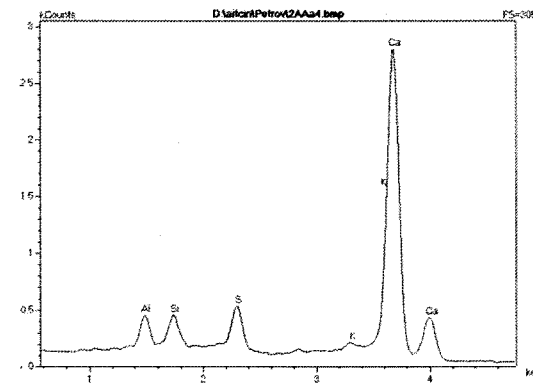
Micrographe A4- Interface pâte/granulats, aucun dépôt d'ettringite.



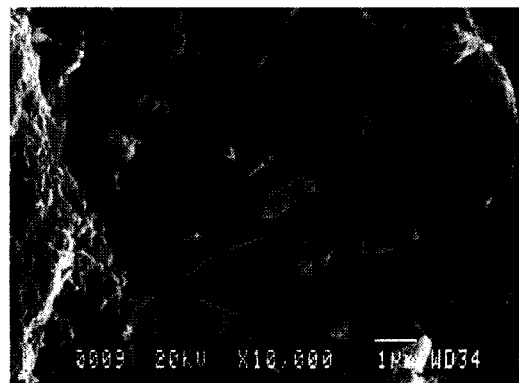
Micrographe A5- Cristaux d'ettringite et de portlandite, dans une bulle d'air entraîné.



Micrographe A7- Cristaux d'ettringite bien formée, lorsqu'il y a assez d'espace pour leur croissance.



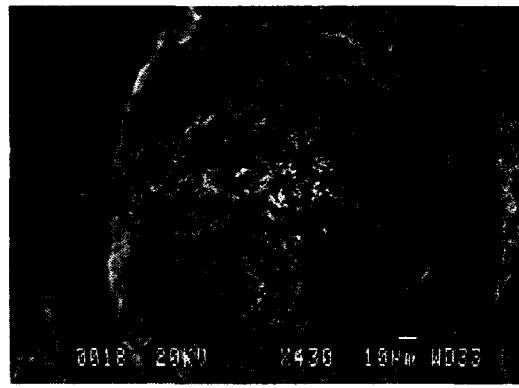
Analyse élémentaire de la région montrant des cristaux d'ettringite présentée au micrographe A7.



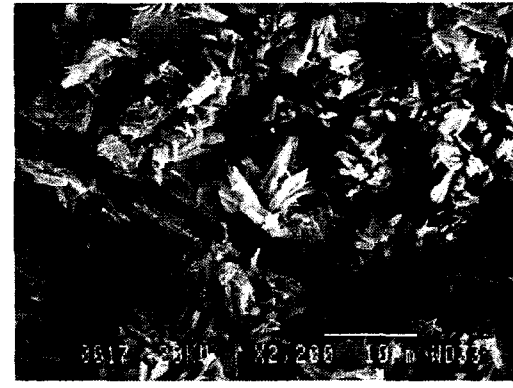
Micrographe A8- Idem au micrographe A7.



Micrographe A9- Idem au micrographe A7.



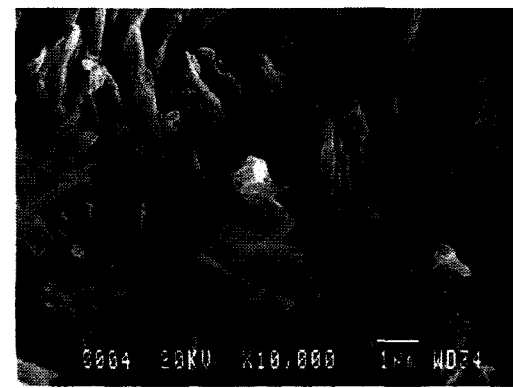
**Micrographe A10-** Bulle d'air partiellement remplie d'ettringite.



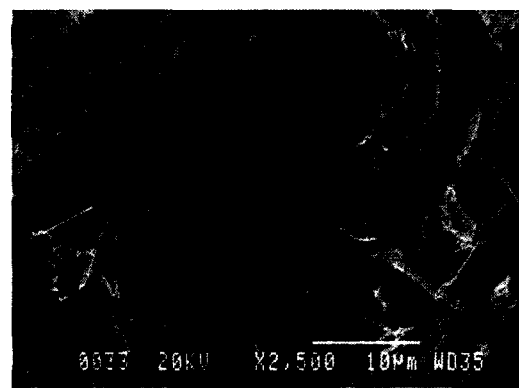
**Micrographe A11-** Grossissement du micrographe A10. Fissure exempte d'ettringite, démontrant que cette dernière n'est pas la cause de la fissuration (dans le cas présenté).



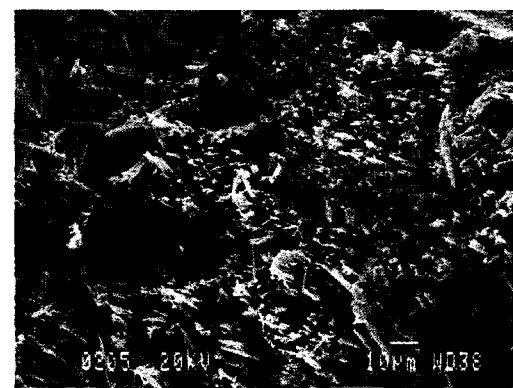
**Micrographe A12-** Remplissage d'une bulle d'air entraîné par de l'ettringite; qui semble important.



**Micrographe A13-** Grossissement du micrographe A12. Il reste suffisamment d'espace vide, entre les cristaux d'ettringite, ce qui montre que cette ettringite n'est pas la cause de la fissuration observée.

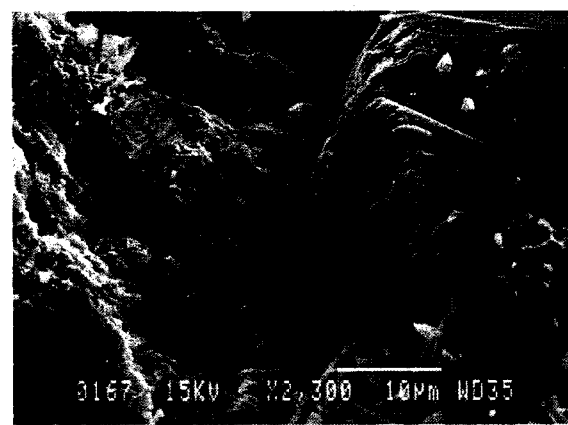


**Micrographe A14-** Important dépôt d'ettringite cristallisée dans l'interface pâte/granulats.

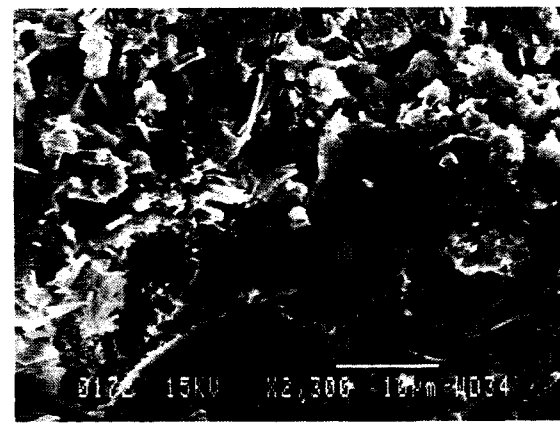


**Micrographe A15-** Idem au micrographe A14.

**10. Passage supérieur Rosemont/Van Horne «échantillon 1»**

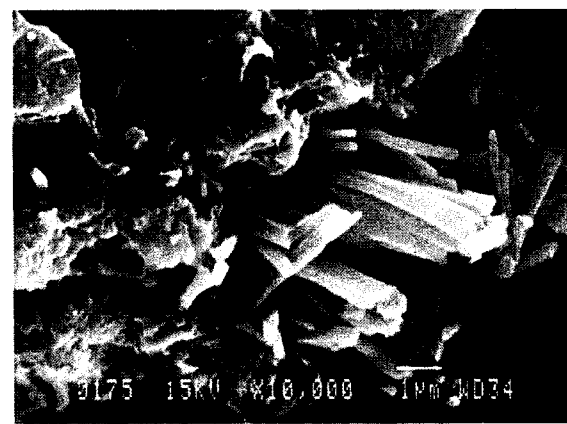


**Micrographe A16-** Zone de transition entre le CSH et le granulat, sans trace d'ettringite.



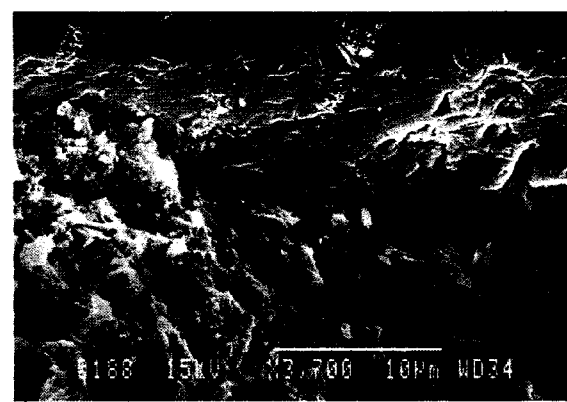
**Micrographe A17-** Faible dépôt d'ettringite, mal cristallisée.

**11. Passage supérieur Rosemont/VanHorne « échantillon 2 »**

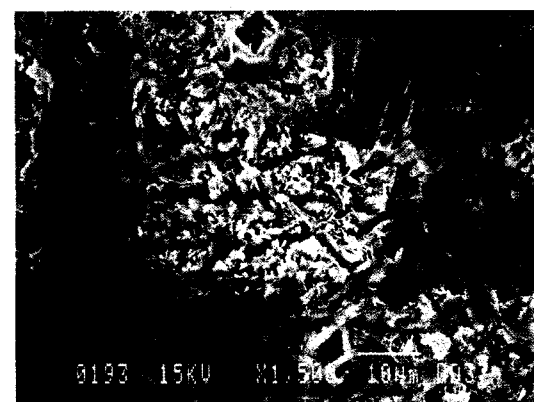


**Micrographe A18-** Vue rapprochée du micrographe 45.

12. Passage inférieur Masson

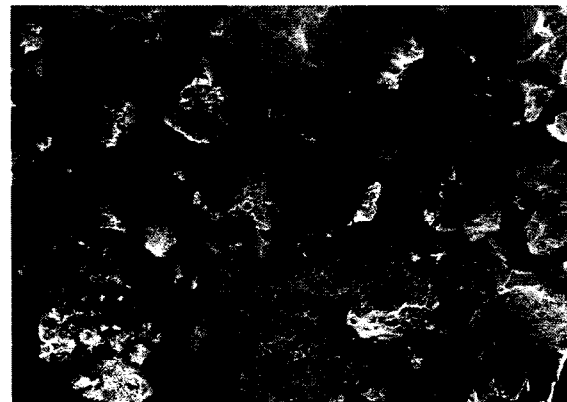


Micrographe A19-

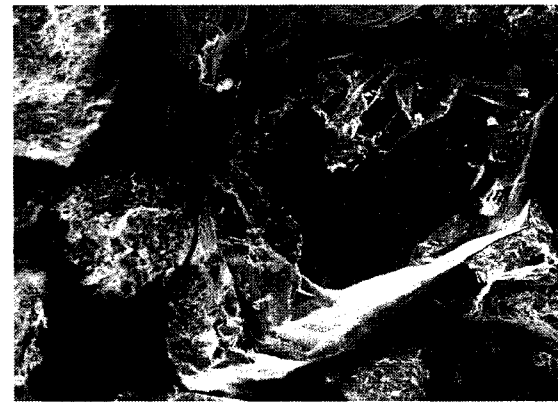


Micrographe A20- Mélange d'ettringite cristallisée et comprimée dans l'interface.

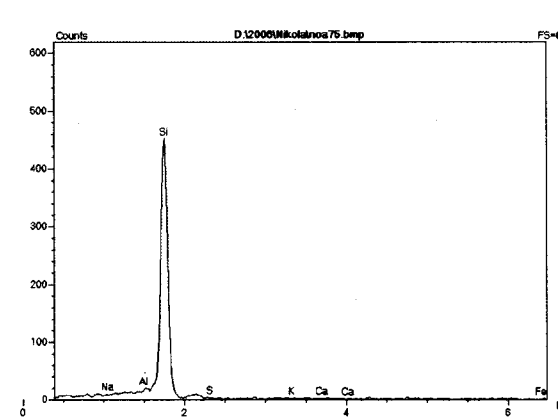
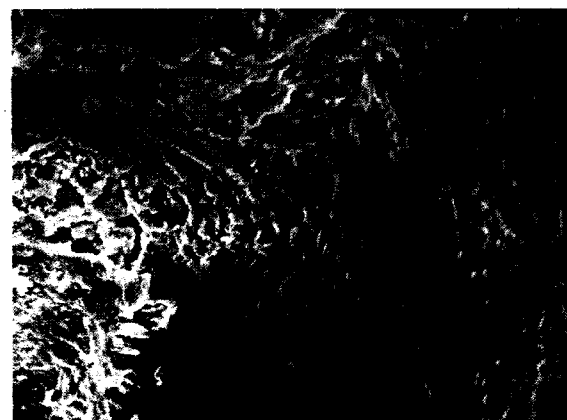
13. Pont du Cosmos



Micrographe A21- Pâte fissurée. Aucun dépôt d'ettringite, dans les bulles d'air entraîné.



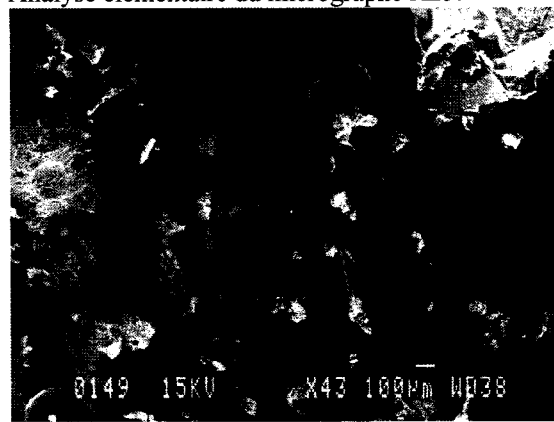
Micrographe A22-



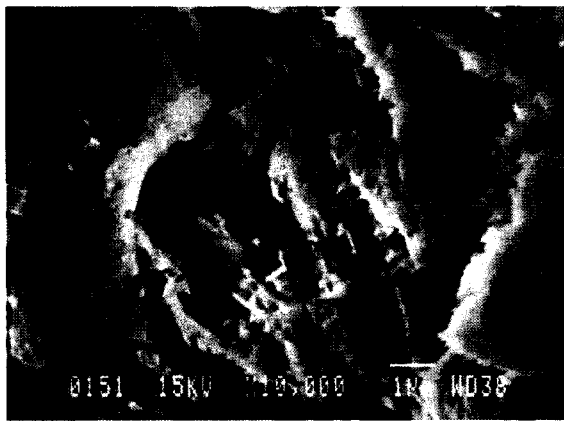
Micrographe A23-



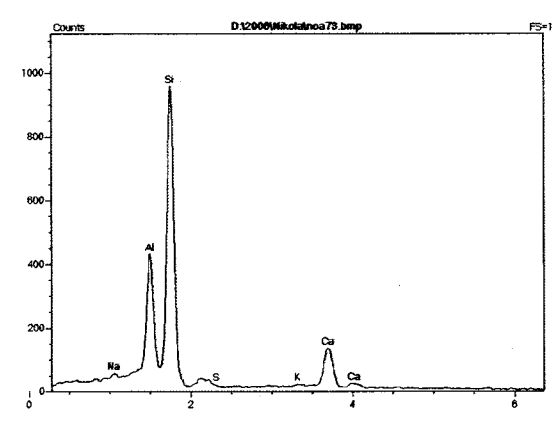
Analyse élémentaire du micrographe A23.



Micrographe A24-

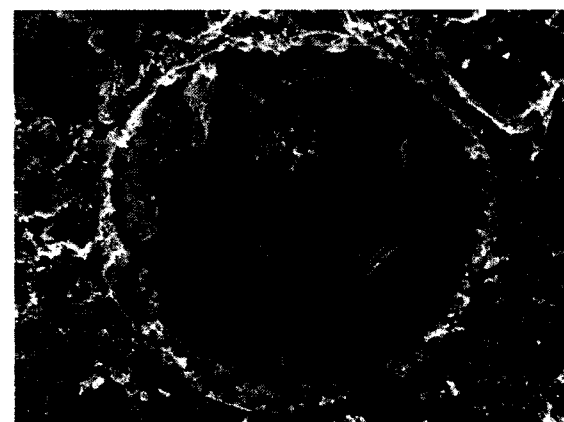


Micrographe A25- Pâte fissurée et poreuse. Aucun dépôt d'ettringite, dans les bulles d'air entraîné.



Micrographe A26-

Analyse élémentaire du micrographe A26.

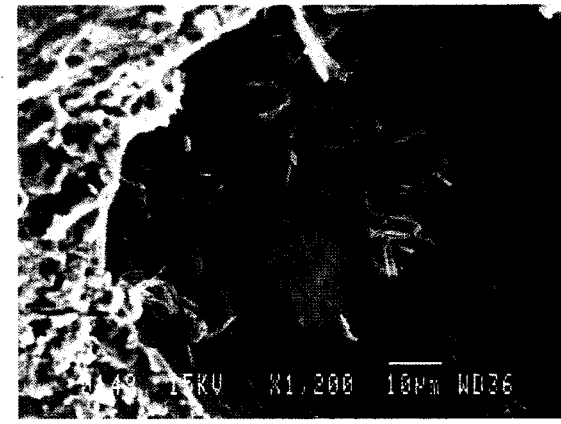


Micrographe A27- Bulle d'air remplie de cristaux d'ettringite, typique d'un vieux béton.

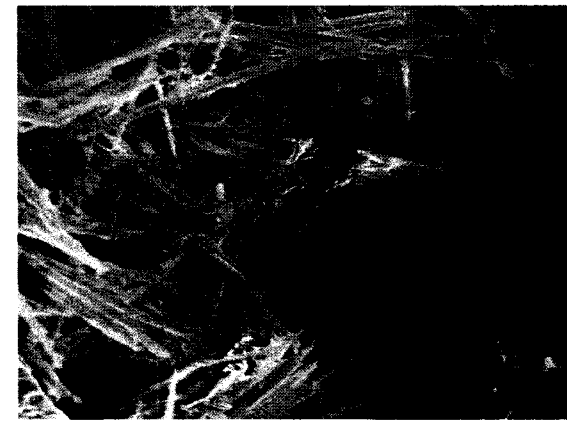
14. Passage inférieur Cavendish



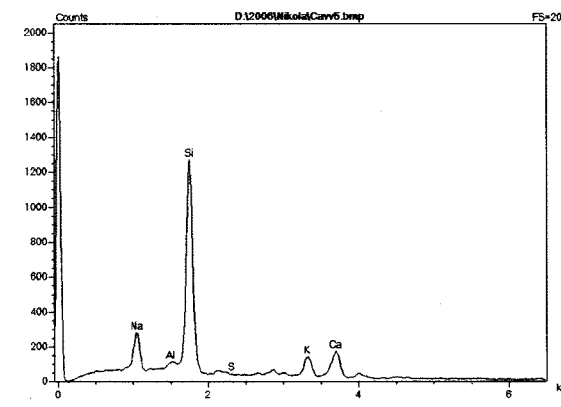
Micrographe A28-Bulle d'air, avec faible dépôt d'ettringite.



Micrographe A29- Bulle d'air, avec faible dépôt de cristaux d'ettringite.



Micrographe A30- Cristaux d'ettringite.



Analyse élémentaire du micrographe A30.