

LES PRODUITS DE LA RÉACTION ALCALIS-SILICE DANS LE BÉTON: ÉTUDE DE CAS DE LA RÉGION DE QUÉBEC

MARC-ANDRÉ BÉRUBÉ ET BENOIT FOURNIER

Groupe de Recherche en Géologie de l'Ingénieur, Département de Géologie, Université Laval, Québec, Québec G1K 7P4

SOMMAIRE

Des réactions chimiques expansives peuvent se produire entre les solutions alcalines interstitielles du béton et certains types de granulats siliceux. Un béton atteint de réactivité alcalis-silice présente très souvent en surface une fissuration polygonale typique et des exsudations de gels silico-alcalins. Ces gels, de même que d'autres produits de réaction, sont également présents dans les pores et les fissures du béton. Le degré de cristallinité, la microtexture, la composition et la distribution spatiale de ces produits dans le béton sont fort variables, et seul le microscope électronique à balayage équipé d'un système d'analyse chimique à dispersion des rayons X en permet une analyse approfondie. Les caractéristiques des produits de réaction observés dans un certain nombre de structures détériorées de la région de Québec sont étudiées et comparées à ce que l'on trouve dans la littérature. D'autre part, l'observation au microscope optique des échantillons en lames minces a permis de reconnaître la nature pétrographique des granulats réactifs présents dans ces structures.

Mots-clés: béton, granulats, réactions alcalis-granulats, produits de réaction, microscopie électronique à balayage, Québec.

ABSTRACT

The reactions between alkaline solutions and siliceous aggregates in concrete are usually revealed by a typical polygonal cracking and by exsudations of silico-alkaline gels on the concrete surface. These gels and other reaction products are also present in pores and cracks of the damaged concrete. The degree of crystallinity, microtexture, composition and spatial distribution of these products in the concrete are quite variable; they are more precisely characterized with a scanning-electron microscope equipped with an energy-dispersion X-ray analyzer. The characteristics of the reaction products observed in samples taken from a certain number of damaged concrete structures in the Quebec City area are discussed and compared with case studies found in the literature. Aggregates considered as alkali-reactive in these structures have been identified in thin sections with an optical microscope.

Keywords: concrete, aggregates, alkali-aggregate reactions, reaction products, scanning-electron microscopy, Quebec.

INTRODUCTION

D'après Mather (1975), tous les granulats sont réactifs dans un béton. Ils ne diffèrent que par les

types de réactions auxquelles ils participent, l'intensité et la rapidité de ces réactions ainsi que par les effets qu'elles provoquent. Cette réactivité peut avoir des effets bénéfiques ou dits pouzzolaniques (renforcement du lien entre granulats et pâte de ciment) (Farran 1956, Massazza et Pezzuoli 1980, Maso 1980, 1982) ou des effets néfastes, comme dans le cas des réactions alcalis-granulats. Ces dernières sont des réactions chimiques se produisant entre la solution interstitielle du béton, fortement basique et alcaline, et certaines phases minérales présentes dans le granulats. Les alcalis proviennent principalement des sulfates et carbonates alcalins solubles présents en petites quantités dans le ciment. Ils peuvent également être fournis par d'autres sources, primaires (feldspaths, zéolites, additifs au béton) ou secondaires (eau de mer, sels de déverglaçage). Outre la présence d'un granulats réactif, deux autres conditions considérées comme essentielles aux réactions sont une forte concentration en alcalis et des conditions d'humidité élevée (Gillott 1975, Idorn 1978, Hobbs 1978, Lendzer et Ludwig 1978, Dolar-Mantuani 1983, Figg 1983, Regourd 1983a, Vivian 1983, Oberholster 1984).

Depuis que le phénomène de réactivité alcalis-granulats a été identifié au début des années 40 dans un barrage de Californie (Stanton 1940, Stanton *et al.* 1942), il a été reconnu dans presque tous les coins du monde. Le Canada n'a malheureusement pas été épargné (réaction alcalis-silice: Price 1961, Dolar-Mantuani 1969, Gillott et Swenson 1973, Duncan *et al.* 1973, Bérard et Lapierre 1977, Grattan-Bellew 1981, Bérard 1985; réaction alcalis-carbonates: Swenson et Gillott 1960, 1964, Hadley 1961, Dolar-Mantuani 1964, Smith 1964, 1972, Rogers 1985).

On distingue deux principaux types de réaction alcalis-granulats (Dolar-Mantuani 1983): la réaction alcalis-silice et la réaction alcalis-carbonates. Quoique les bétons affectés par l'une ou l'autre de ces "maladies" présentent en commun un certain nombre de symptômes, comme l'expansion, l'éclatement ("pop-outs") et la fissuration (Oberholster 1984), la décohesion des interfaces entre la pâte de ciment et les granulats réactifs (Regourd *et al.* 1982), et, en surface, une fissuration polygonale caractéristique ("map-cracking") (Figg 1976), ces deux types de réactions sont foncièrement différents, autant dans leur mécanisme de réaction que dans la nature des phases réactives impliquées.

Nous ne nous intéresserons ici qu'à la réaction alcalis-silice, sans doute la plus répandue. La formation de gels silico-alcalins est un indice très caractéristique de ce type de réaction (Regourd *et al.* 1982, Krogh 1975, Dent-Glasser et Kataoka 1982). Ces gels tapissent ou remplissent des pores de la pâte de ciment ou des fissures présentes autant dans les granulats réactifs que dans le mortier et se présentent parfois aussi sous forme d'exsudations blanchâtres à la surface du béton (Baronio 1984, Oberholster 1984). Ils possèdent un éclat tantôt résineux, tantôt vitreux et, au moins sous le microscope, présentent généralement un réseau de dessiccation du type "mud-crack" (Baronio 1984).

Ce travail présente les caractéristiques microtexturales, chimiques et cristallographiques des produits de la réaction alcalis-silice observés dans des échantillons provenant de structures en béton de la région de Québec. La nature des granulats réactifs impliqués est également examinée.

REVUE DE LA LITTÉRATURE

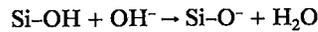
La solution interstitielle du béton

Lors du gâchage du ciment et au moment de la prise du béton, laquelle survient une ou quelques heures après, une série d'intenses réactions se produisent, impliquant les silicates de calcium $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ et $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, les aluminates de calcium et de fer $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ et $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{FeO}$, et le gypse $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ contenus dans le ciment, et il y a formation de silicates de calcium hydratés (appelés CSH), de portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ et d'ettringite $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$ (Regourd 1982b, d). Les concentrations en ions alcalins, fournis principalement par les sulfates et carbonates alcalins du ciment, augmentent rapidement au cours des premiers jours, pour ne fluctuer que de façon mineure par la suite (Diamond 1975b, Longuet *et al.* 1973). Il en est de même de la concentration en ions OH^- , qui peut atteindre des valeurs aussi élevées que 0.7 mole/litre (Longuet *et al.* 1973), ce qui correspond à un pH supérieur à 13.5, et à plus de 15 fois la concentration en ions OH^- d'une solution pure saturée en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Longuet *et al.* 1973, Diamond 1975b). La concentration en ions calcium augmente rapidement au début, mais de façon éphémère puisqu'elle tombe, quelques mois seulement après le gâchage, sous la limite de détection (Longuet *et al.* 1973, Diamond 1975a, b, 1983).

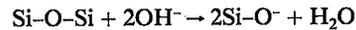
Les mécanismes de la réaction alcalis-silice

Les minéraux du groupe de la silice sont chimiquement instables dans un milieu à pH élevé (Iler 1979, Wilding *et al.* 1977). Leur structure cristalline présente une certaine quantité, variable selon les espè-

ces, de groupes silanols acides (Si-OH). Les ions OH^- de la solution interstitielle du béton s'attaquent à ces groupes silanols:



créant ainsi des radicaux Si-O^- dont la charge négative est contrebalancée par la pénétration d'ions alcalins présents dans la solution (Dent-Glasser et Kataoka 1981a, b). Les ions OH^- s'attaqueraient ensuite aux ponts siloxanes (Si-O-Si) eux-mêmes:



affaiblissant davantage la structure cristalline du minéral et permettant à la solution et aux ions OH^- et alcalins de la pénétrer plus profondément, tout en amenant la neutralisation des nouveaux sites Si-O^- générés (Dent-Glasser et Kataoka 1981a, b).

Le produit de ces réactions est une substance colloïdale (Vivian 1983), un gel contenant silicium et alcalins, mais également une quantité non négligeable de calcium (Diamond 1983). Le mécanisme de base serait sensiblement le même pour toutes les variétés de silice, mais c'est surtout au niveau de la vitesse de réaction que s'établirait la distinction, les minéraux silicieux pauvrement ordonnés, hydratés et plus poreux (opale, calcédoine . . .) ou encore moins stables aux conditions normales (tridymite, cristobalite . . .) réagissant plus rapidement (Dent-Glasser et Kataoka 1981a, b, Figg 1983, Regourd 1983b). Certaines variétés de quartz seraient également réactives, mais à un degré moindre; c'est le cas de celles qui ont subi des contraintes mécaniques ou métamorphiques (quartz à extinction roulante ou à joints suturés) ou qui contiennent un grand nombre de pores et d'inclusions microscopiques (comme certains ciments siliceux dans des grès) ou qui présentent une texture microcristalline (comme dans les verres volcaniques dévitrifiés) (Dolar-Mantuani 1983, Figg 1983).

De façon générale, on considère que l'expansion et la fissuration du béton atteint de réactivité silico-alcaline résultent du gonflement, par absorption de solution, des gels hydrophiles produits par transformation des phases siliceuses réactives présentes dans les particules du granulats, ceci ayant pour conséquence l'augmentation du volume de ces particules, l'application de fortes pressions sur la pâte de ciment avoisinante, la création de microfissures à travers les particules réactives et la pâte de ciment, et l'expansion du béton (Hansen 1944, Powers et Steinour 1955, Lea 1973, Vivian 1983, Dent-Glasser et Kataoka 1981b, Figg 1983).

TABLEAU 1. COMPOSITIONS CHIMIQUES DE PRODUITS DE REACTIONS ALCALIS-SILICE*

Composition	Stanton (1942)	McConnell et al. (1947)	Hester (1956)	Idorn (1981)											
SiO ₂	53.9	81.9	53.4	58.7	63.0	56.9	61.7	65.5	73.7	72.8	61.9	56.8	76.7	56.1	28.5
CaO	2.9	1.1	4.7	---	15.0	17.7	0.6	0.5	1.1	1.3	---	---	3.3	17.4	22.4
Na ₂ O	12.9	4.0	12.7	19.9	3.5	1.0	14.9	13.4	17.9	9.4	14.6	16.2	11.4	8.2	8.3
K ₂ O	---	2.0	4.6	6.5	7.0	6.6	5.2	5.1	8.2	4.1	6.2	5.7	6.0	4.1	5.0

Composition	Buck et Mather (1969)	Arsberetning (1969)	Thaulow et Knudsen (1975b)				Poole (1975,1976)				French (1976)			
SiO ₂	66.0	33.2	38.8	81.7	82.3	69.6	49.2	39.4	53.0	64.6	49.6	55.8	62.1	63.7
CaO	11.6	58.0	47.8	3.6	6.7	21.5	48.9	59.9	22.1	0.1	0.4	0.4	36.2	26.6
Na ₂ O	1.3	0.2	0.2	1.2	1.0	0.8	0.0	0.0	7.4	0.4	1.8	8.0	1.2	8.9
K ₂ O	19.0	0.5	2.6	13.5	10.0	8.1	1.9	0.7	0.7	0.6	0.4	0.7	0.5	0.8

Composition	Buck et Mather (1978)				Regourd et al. (1981): gels près des granulats								gels dans la pâte de ciment					
SiO ₂	49.8	61.7	50.7	66.0	85.9	53.8	51.1	63.5	54.1	63.6	59.5	58.8	55.3	27.9	34.7	34.1	36.5	35.3
CaO	21.1	12.3	4.7	11.6	1.3	23.7	21.5	17.8	15.5	13.0	13.0	13.6	13.2	35.2	41.4	39.3	40.5	41.5
Na ₂ O	---	---	6.8	1.3	2.4	0.4	0.4	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
K ₂ O	---	---	6.7	19.0	0.6	1.7	4.7	2.8	0.8	4.2	5.1	5.1	6.5	0.7	0.4	0.6	0.6	0.4

Composition	Oberholster (1983)														Baronio (1983)			
SiO ₂	61.5	53.8	40.2	57.8	42.2	61.0	40.2	59.9	53.3	49.7	40.8	46.5	57.9	49.9	50.4	62.9	53.2	66.5
CaO	9.2	8.2	8.0	12.1	9.1	12.5	9.1	12.2	9.3	12.7	8.5	9.1	10.9	12.8	12.0	12.9	10.0	6.5
Na ₂ O	1.0	1.0	0.8	0.8	0.8	1.9	0.6	1.2	0.7	0.9	2.0	1.6	2.0	1.8	1.7	1.4	0.8	1.2
K ₂ O	6.9	6.3	4.6	5.7	6.7	7.9	4.9	6.3	7.2	6.3	7.7	7.8	6.8	6.5	5.2	9.0	7.5	4.2

* Résultats tirés de la littérature et donnés en pourcentages massiques.

** Les données de Thaulow et Knudsen (1975b) et de French (1976) sont exprimées sous forme anhydre.

Composition chimique des produits de réaction

L'examen de la littérature sur le sujet permet de constater que les produits de la réaction alcalis-silice sont très variables en composition (Tableau 1). Les deux constituants habituellement les plus abondants sont SiO₂ (28 à 86%) et CaO (0.1 à 60%), pendant que K₂O varie entre 0.4 et 19%, et Na₂O, entre 0 et 20%. Pour les données présentées au Tableau 1, on obtient un contenu moyen en H₂O d'un peu plus de 20%, dans la mesure où l'on estime que ce contenu est égal au complément de la somme des autres oxydes présentés. La composition des produits dépendrait de la composition du ciment et du granulat (Regourd *et al.* 1978, Regourd 1982a), mais elle pourrait également être influencée par d'autres facteurs secondaires, comme par exemple les sels de déverglage (Bérard et Lapierre 1977).

La composition chimique des gels (rapports CaO:SiO₂, SiO₂:Na₂O + K₂O, *etc.*) influencerait leur capacité d'absorption et d'expansion (Powers et Steinour 1955, Verbeck et Gramlich 1956, Lea 1973, Dent-Glasser et Kataoka 1981b, Diamond *et al.* 1981, Vivian 1983). Powers et Steinour (1955) ont d'abord soumis l'hypothèse que les gels à base de calcium étaient peu expansifs ("safe reaction") comparativement aux gels riches en alcalis. Cependant, des études récentes (Struble et Diamond 1981a, b, Diamond *et al.* 1981) ont démontré que le problème n'était pas si simple puisque des gels synthétiques pauvres en calcium ont offert de fortes variations dans leur capacité de gonfler librement ("free swelling") et de créer des expansions sous contraintes, alors que des gels calciques se sont avérés naturellement gonflants (Diamond 1983).

Microtexture et distribution des produits de réaction

Au microscope électronique à balayage, les pro-

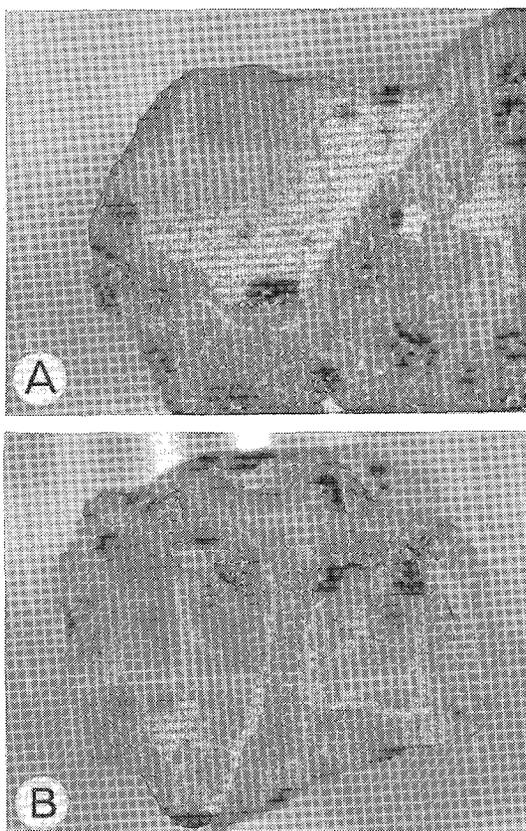


FIG. 1. Zonation typique rencontrée sur la surface de fracture d'un granulat provenant d'un béton atteint de réactivité alcalis-silice. On observe une auréole foncée en bordure du granulat, suivie, vers l'intérieur, d'un dépôt blanchâtre. Ce dernier peut former une mince auréole adjacente à l'auréole périphérique foncée et entourer une zone saine du granulat (A), ou peut recouvrir toute la portion interne de la surface de fracture (B).

TABLEAU 2. DONNÉES RELATIVES AUX STRUCTURES EN BÉTON ÉCHANTILLONNÉES

STRUCTURE	TYPE DE STRUCTURE	AGE	LOCALISATION	GRANULAT	ECHANTILLONS
Trois-Rivières TR-1	Dalle de route	1975	Bécancour	Calcaire siliceux	1
" TR-2	"	1975	"	"	3
Barrage Sartigan SAR	Pont-barrage	1967	Beauce	Tuf rhyolitique	10
Pont Samson	Pont	<1945	Quebec	Calcaire	2
Canadien National CN-1	Viaduc ferroviaire	1931	"	"	1
" CN-2	"	1944	"	"	1
" CN-3	"	1929	"	"	2
" CN-4	"	1951	"	"	1
Port de Québec VP-1	Quai	1949	"	"	3
" VP-3	"	1958	"	"	1
" VP-4	"	1975	"	"	1
" VP-5	"	1960	"	"	1
" VP-6	"	1915	"	"	1
" VP-7	"	1967	"	"	1
" VP-8	"	1979	"	"	1
" VP-9	"	1977	"	"	1
" VP-10	Parapet de quai	1928	"	"	1
" VP-12	Quai	1931	"	Grès quartzitique	1
Boul. Du Vallon VAL-1	Echangeur routier	1965	Ste-Foy	Calcaire	2
" VAL-2	Barrière médiane	1982	"	"	1
Route 138	"	1975	Beauport	"	4
Autoroute 40	"	1972	"	"	6
Autoroute 40	"	1980	Québec	"	4
Autoroute 440	"	1980	Beauport	"	3
TOTAL: 24					TOTAL: 53

duits de la réaction alcalis-silice peuvent présenter des textures très diverses, variant de celle d'un gel amorphe plus ou moins craquelé à celle de phases silicatées cristallines (Regourd 1979, Regourd *et al.* 1981). Ces dernières se présentent généralement sous forme de rosettes constituées d'un assemblage de cristaux lamellaires (Oberholster 1983, Oberholster et Krüger 1984, Regourd 1983b, c, Regourd *et al.* 1981), rosettes dispersées ou formant des agrégats serrés.

Mégaoscopiquement, des auréoles de réaction très caractéristiques sont fréquemment observées sur les surfaces de fracture produites à travers les particules des granulats siliceux réactifs (Regourd 1979, 1982a, b, 1983a, b, Regourd *et al.* 1978, 1981, 1982, Cole *et al.* 1981, Oberholster 1983, 1984, Oberholster et Krüger 1984, Buck et Mather 1978, Baronio 1984, Deloye *et al.* 1982). On note d'abord, à la périphérie du granulats, une auréole foncée, suivie, vers l'intérieur, d'un dépôt beaucoup plus clair, parfois d'un blanc légèrement bleuté, qui recouvre toute la zone intérieure du granulats (Fig. 1B) ou qui forme lui-même une auréole autour d'une zone centrale non altérée (Fig. 1A).

ÉCHANTILLONS ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

Au cours de l'automne 1983, nous avons carotté

un certain nombre de structures de béton de la région de Québec qui présentaient des indices de détérioration pouvant s'apparenter aux phénomènes de réactivité alcalis-granulats (fissuration polygonale de surface, exsudations de gels, extrusion des scellants de joints, expansion). En guise de comparaison, deux structures furent également échantillonnées dans la région de Trois-Rivières et une autre dans la Beauce. On trouvera au Tableau 2 la localisation, le type et l'âge des structures échantillonnées. Au total, 53 échantillons provenant de 24 structures différentes ont été étudiés.

Ces échantillons furent examinés au stéréomicroscope afin de vérifier l'état de détérioration du béton et la présence d'indices caractéristiques de réactivité chimique délétère (gels siliceux, auréoles de réaction, microfissuration, *etc.*). Des fragments d'un certain nombre d'entre eux furent ensuite analysés au microscope électronique à balayage équipé d'un système d'analyse chimique basé sur la dispersion d'énergie des rayons X (EDXA). Cet instrument nous a permis d'observer beaucoup plus finement la texture des produits de réaction mais aussi d'analyser qualitativement leur composition chimique. Des échantillons de ces produits de réaction ont également été analysés par diffraction des rayons X (diffractomètre, chambres Debye-Scherrer et Guinier)

afin d'obtenir des informations sur leurs propriétés cristallines et, si possible, de les identifier plus précisément. Enfin, des lames minces ont été préparées à partir des échantillons de béton contenant des granulats montrant des évidences de réactivité, et examinées au microscope polarisant dans le but principal d'identifier la nature pétrographique des granulats réactifs.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Observations préliminaires

Plusieurs échantillons présentaient effectivement des indices de réactivité alcaline. Parmi ceux-ci, nous avons fréquemment observé, sur des surfaces de fractures produites à travers les particules des granulats grossiers, l'arrangement typique dont nous avons déjà discuté, caractérisé par une auréole foncée en périphérie du granulat réactif, suivie, vers l'intérieur, de dépôts blanchâtres (Fig. 1). Plusieurs granulats contenaient également de petites fissures tapissées de gel siliceux blanchâtre, fissures se propageant dans la pâte de ciment. Dans plusieurs cas, les granulats étaient littéralement déchaussés lors de la fracturation des échantillons.

Nous avons aussi fréquemment observé des dépôts de gels craquelés tapissant le réseau de fractures dans la pâte de ciment de même que des pores. Ces gels avaient tendance à être plus abondants à proximité de granulats réactifs montrant des auréoles de réaction. Dans les pores, les gels étaient la plupart du temps constitués de deux couches distinctes, montrant souvent une texture de dessiccation du type "mud cracks": la première, accolée immédiatement aux parois des pores, était composée de gels transparents à translucides, à éclat vitreux ou très légèrement résineux, tandis que la seconde était formée de gels blanchâtres, tantôt pulvérulents, tantôt durs et crayeux. Un tel arrangement a également été rapporté dans plusieurs publications traitant de structures détériorées par la réactivité alcalis-silice (Bérard et Lapierre 1977, Cole *et al.* 1981, Cole et Lancucki 1983, Buck et Mather 1978, Oberholster *et al.* 1984). D'autre part, certains pores étaient littéralement remplis de dépôts mous de couleur blanchâtre.

Nous avons également remarqué la présence d'ettringite riche en silicium dans la majorité des échantillons de béton montrant des évidences de réactivité alcaline. D'après Hugues Hornain du Centre de Recherche sur les Liants Hydrauliques (communication personnelle, Paris, 1984), il s'agirait plus précisément d'ettringo-thaumasite.

Microtexture des produits de réaction

L'analyse des échantillons au microscope électronique à balayage nous a permis d'observer la micro-

texture des produits de réaction. À ce chapitre, ces produits sont très diversifiés. On observe en effet tous les types de textures suivants, que l'on peut reconnaître sur les Figures 2 à 5: 1. Couche de gel amorphe plus ou moins craquelé et à surface soit a) unie (Fig. 2A), b) plus ou moins boursouflée ou botryoïdale (10-50 micromètres) (Figs. 2B, C), c) finement réniforme (< 2 micromètres) (Figs. 2D, E, F), ou d) à la fois botryoïdale (10-50 micromètres) et finement réniforme (< 2 micromètres) (macro- et microrelief) (Figs. 3A, B). 2. Couche de gel plus ou moins craquelé et partiellement ou totalement recristallisé à partir de sa surface, laquelle présente souvent une texture finement alvéolaire (Figs. 3C, D, E, F). La surface peut être régulière (Figs. 3C, D) ou botryoïdale (10-50 micromètres) (Figs. 3E, F). 3. Rosettes de cristaux lamellaires dispersées (sur un gel ou sur le granulat) (Figs. 4A, B), ou formant un "tapis" plus dense sur le granulat (Figs. 4D, E), ou des dépôts dans des pores de la pâte de ciment. 4. Touffes de cristaux fibreux et radiés dispersées sur du gel massif (Fig. 4C). 5. Globules à texture de surface très finement alvéolaire (Fig. 5B) à lamellaire malformée (Figs. 4B, 5A, C), dispersés (Figs. 4B, 5C) ou en tapis (Figs. 5A, B) sur le granulat.

Au point de vue localisation des produits de réactions dans les échantillons examinés, les dépôts sont classifiés comme suit: A. Pore dans la pâte de ciment. B. Surface de fracture dans la pâte de ciment. C. Surface de fracture à travers un granulat réactif: auréole périphérique mégascopiquement foncée. D. Surface de fracture à travers un granulat réactif: site intermédiaire entre les sites C et E. E. Surface de fracture à travers un granulat réactif: site plus interne montrant des dépôts blanchâtres.

Les Tableaux 3a et 3b présentent une synthèse de nos résultats concernant la microtexture et la composition chimique (anhydre) approximative des produits de réaction observés dans les échantillons. On remarquera que les gels amorphes (types 1a, 1b, 1c) ou recristallisés (type 2), de même que les dépôts de rosettes lamellaires (type 3), sont courants, alors que certaines textures (types 1d, 4 et 5) n'ont respectivement été observées que dans un seul des échantillons examinés. Dans la littérature (Tableau 4), les gels de types 1a et 1c de même que les rosettes lamellaires (type 3) sont couramment observés. Mentionnons que le gel microréniforme (type 1c) est aussi qualifié de microcristallin (Regourd *et al.* 1981) ou de recristallisé (Regourd 1982c) dans la littérature. Le gel de type botryoïdal (1b) et les touffes fibreuses (type 4) ne sont toutefois observés que dans un cas dans la littérature, et certaines textures reconnues dans nos échantillons (types 1d et 5) n'ont pas, à notre connaissance, été rapportées jusqu'ici.

Comme on le remarque également aux Tableaux 3a et 3b, on peut retrouver plusieurs types de dépôts dans un même échantillon, et il n'est pas possible

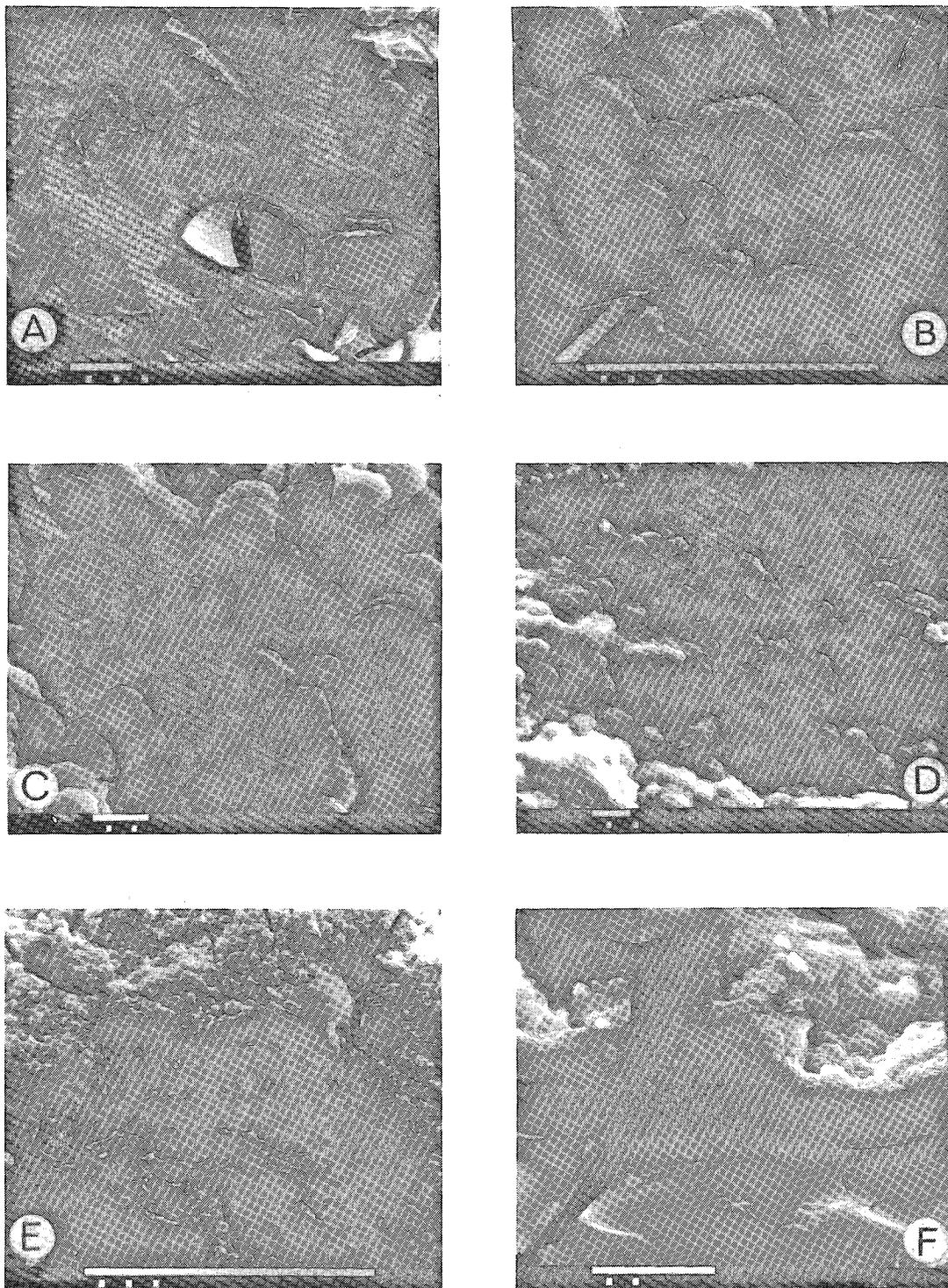


FIG. 2. A. Gel massif à surface unie (type 1a) sur une surface de fracture de la pâte de ciment (site B). Echantillon VAL-1, échelle linéaire de 100 micromètres. B. Gel massif à surface botryoidale (type 1b) sur la surface de fracture d'un granulat calcaire (site intermédiaire D de dépôts blanchâtres). Echantillon CN-3A, échelle linéaire de 100 micro-

de tirer quelque corrélation que ce soit entre la morphologie des dépôts et l'âge de la structure échantillonnée. On observe en effet des gels amorphes (type 1a) dans des structures aussi bien âgées (CN-3) que jeunes (TR-2, VAL-1). Cependant, de façon générale, les gels tendent à être plus fortement recristallisés dans les plus vieilles structures (VP-10, CN-2) que dans les plus jeunes (TR-1, VAL-1). Quant aux dépôts cristallins de rosettes lamellaires (type 3), ils se retrouvent à peu près dans tous les échantillons examinés. Il n'est également pas possible de relier la texture des dépôts au type de granulat réactif impliqué. On notera toutefois que le seul échantillon contenant du grès quartzitique (VP-12) présente un type de dépôt (type 5) particulier.

De façon très générale, on observe une distribution bien définie quant à la texture des produits de réaction. Dans les pores (site A) ainsi que sur les surfaces de fracture (site B) de la pâte de ciment, on observe principalement des gels à surface unie et plus ou moins recristallisés (types 1a, 2). Sur les surfaces de fracture des granulats réactifs, on remarque, à partir de l'auréole mégascopiquement foncée (site C) jusqu'à la zone interne caractérisée par des dépôts blanchâtres (site E), des gels qui deviennent de plus en plus irréguliers en surface (botryoïdaux, microréniformes) (types 1b, 1c, 1d) pour laisser progressivement ou brusquement la place à des "tapis" de rosettes lamellaires (type 3). Ces observations sont en très bon accord avec la littérature (Deloye *et al.* 1982, Regourd 1982a, Regourd *et al.* 1978, Oberholster 1983). Une séquence typique de cette distribution peut être représentée par les micrographies 2B, 3A et 4E, caractérisant l'échantillon CN-3A. On observe également, dans la zone intermédiaire (site D) et même dans la zone périphérique (site C), des rosettes lamellaires (type 3) ou des touffes fibreuses (type 4) dispersées et déposées directement sur des gels. Nous avons de plus parfois observé des dépôts en rosettes dans des pores de la pâte de ciment, tout comme Oberholster (1983) et Oberholster et Krüger (1984).

Composition chimique des produits de réaction

Le microscope électronique à balayage utilisé était équipé d'un spectromètre à dispersion d'énergie des rayons X (EDXA), ce qui a permis d'obtenir la composition chimique approximative des différents produits examinés. À cet effet, à partir du spectre de

rayons X obtenu pour chaque produit, nous avons tout simplement mesuré les intensités des raies $K\alpha$ correspondant aux éléments majeurs d'intérêt (Al, Si, K, Ca) pour ensuite les transformer en teneurs d'oxydes en mesurant aux mêmes conditions la sensibilité de ces éléments dans un étalon poli d'un silicate complexe (hornblende). Enfin, les concentrations ont été normalisées de façon à ce que la somme des oxydes analysés soit égale à 100%. Les résultats apparaissent aux Tableaux 3a et 3b. Nous sommes bien conscients qu'il s'agit là de résultats tout au plus semi-quantitatifs en raison du relief observé à la surface des phases analysées (Diamond *et al.* 1974). Pour la même raison, nous avons jugé inutile d'appliquer les corrections de matrice habituelles tenant compte des différences de composition chimique entre l'étalon et les phases analysées (ZAF), d'autant plus que cet étalon n'était pas très différent chimiquement des produits étudiés. Rappelons également que les résultats d'analyses tirés de la littérature et donnés au Tableau 2 présentent des teneurs en H_2O très variables, pour une moyenne d'un peu plus de 20%, alors que celles présentées aux Tableaux 3a et 3b sont sous forme anhydre, en raison de la normalisation appliquée.

Les gels (types 1 et 2) présentent, comme dans la littérature (Tableau 2), de très grandes variations de composition d'un échantillon à un autre (SiO_2 : 20 à 90%, K_2O : 3 à 10%, CaO : 6 à 76% (base anhydre), CaO/SiO_2 : 0.07 à 3.8), mais également dans un même échantillon (VAL-1, SAR-1B, VP-10, CN-2, CN-3A). L'absence ou la très faible concentration en sodium reflète bien le fait que les ciments produits dans notre région sont beaucoup plus riches en potassium qu'en sodium. Outre la présence des trois éléments silicium, calcium et potassium, communs à tous les gels analysés, du chlore a également été détecté à l'occasion dans ceux de la structure de Beauce (SAR-1). Sa provenance est inconnue, étant donné que la structure ne semble pas être soumise à des épandages de sels de déverglaçage.

Dans un même échantillon, les gels semblent devenir plus siliceux lorsque l'on se déplace de la pâte de ciment (sites A, B) vers l'intérieur du granulat (sites C, D et E), ce qui avait d'ailleurs été rapporté dans la littérature (Regourd 1979, 1982a, Regourd *et al.* 1981, Deloye *et al.* 1982). Ceux au contact de la pâte de ciment sont définitivement plus calciques que ceux retrouvés dans les fractures des granulats (CN-2, VAL-1, SAR-1B), ce qui est également en

mètres. C. Gel massif à surface fortement botryoïdale (type 1b) sur la surface de fracture d'un granulat de grès quartzitique (site D). Échantillon VP-12, échelle linéaire de 10 micromètres. D. Gel massif à surface microréniforme (type 1c) sur la surface de fracture d'un granulat calcaire (site D). Échantillon CN-2, échelle linéaire de 10 micromètres. E. Gel massif à surface microréniforme (type 1c) sur la surface de fracture d'un granulat de tuf rhyolitique (site C, auréole périphérique foncée). Échantillon SAR-1B, échelle linéaire de 100 micromètres. F. Gel massif à surface microréniforme (type 1c) sur la surface de fracture d'un granulat calcaire (site C). Échantillon TR-2A, échelle linéaire de 10 micromètres.

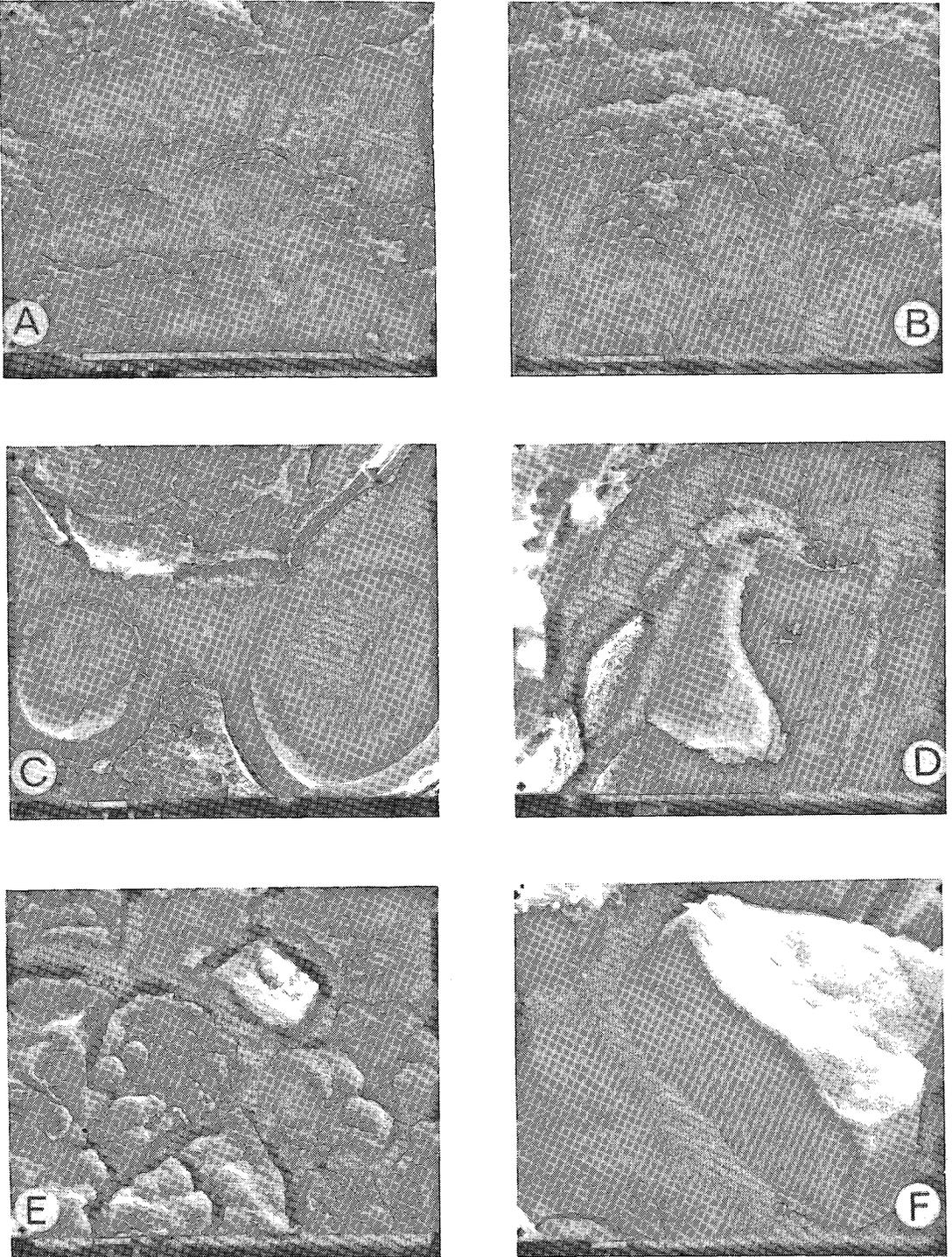


FIG. 3. A. Gel massif à surface à la fois botryoïdale et microréniforme (type 1d) sur la surface de fracture d'un granulat calcaire (site intermédiaire D de dépôts blanchâtres). Echantillon CN-3A, échelle linéaire de 100 micromètres. B. Vue rapprochée du gel de la micrographie précédente. Echelle linéaire de 10 micromètres. C. Gel légèrement recryst-

accord avec la littérature (Regourd 1983b, Regourd *et al.* 1981) et appuie l'hypothèse d'un enrichissement en calcium (Diamond 1975b, Knudsen et Thaulow 1975, Buck et Mather 1978, Regourd *et al.* 1981). Les gels auraient en effet accaparé du calcium par dissolution des cristaux de portlandite avec lesquels ils seraient venus en contact, et perdu progressivement leurs alcalis par diffusion dans la pâte (Diamond 1975b). Thaulow et Knudsen (1975a) ainsi que Buck et Mather (1978) ont effectivement remarqué un appauvrissement en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dans les sections de béton atteintes de réactivité alcaline.

Dans le cas des gels à surface botryoïdale (types 1b, 2), on remarque souvent que la composition est plus siliceuse sur le sommet des rognons qu'entre ceux-ci (2: VP-10, 1b: CN-3A). De plus, des mesures de composition chimique effectuées en section à travers des couches de gels déposés sur la surface de fracture de granulats calcaires semblent montrer que les gels sont plus calciques dans leur partie inférieure, *i.e.*, en contact avec le calcaire (2: CN-2, 2: TR-1, 1c: TR-2A, 2: VAL-1). Il a pu y avoir enrichissement en calcium par les granulats sous-jacents aux gels. Il est d'ailleurs intéressant de mentionner qu'un enrichissement en silicium a été plutôt observé dans la partie inférieure (*i.e.*, immédiatement en contact avec le granulats) d'une couche de gel déposée sur un granulats cette fois siliceux (SAR-1B). Enfin, il est très difficile de tirer des corrélations entre la composition des gels, l'âge de la structure ou la nature du granulats réactif impliqué. Mentionnons que toutes les structures échantillonnées contenaient un granulats calcaire, à l'exception de celle de Beauce (SAR) (tuf rhyolitique) et de VP-12 (grès quartzitique).

Contrairement aux gels, on remarquera que la composition chimique des dépôts de rosettes lamellaires (type 3) (SiO_2 : 68 à 83%, K_2O : 5 à 12%, CaO : 10 à 22%, sur une base anhydre) est relativement stable quel que soit l'échantillon examiné, leur emplacement (surfaces de fracture de granulats ou des pores de la pâte de ciment) (3: TR-2B) et le type de granulats présent dans le béton. Ces dépôts sont aussi généralement plus siliceux et plus potassiques que les gels coexistants dans le même échantillon (VP-12, CN-3A, CN-3B), ce qui appuie les observations de Baronio (1983) et de Regourd (1979). Dans les échantillons de Beauce (SAR), ils contiennent également du chlore à l'occasion, tout comme les gels associés. Quant aux touffes fibreuses (type 4), observées dans un seul de nos échantillons (4: CN-3B),

elles semblent un peu plus calciques et un peu moins potassiques et siliceuses que les rosettes lamellaires présentes dans le même échantillon (3: CN-3B).

Le produit de réaction de type 5 (globules) (Figs. 4B, 5A, B, C) est très particulier à la structure VP-12. Il est riche en silicium (56 à 63%) et, ce qui le différencie des autres produits observés, également riche en aluminium (20 à 27% Al_2O_3). Il contient aussi du potassium (8 à 11% K_2O) et du calcium (6 à 8% CaO). Le granulats présent dans cette structure est différent; il s'agit d'un grès quartzitique. L'aluminium pourrait provenir des feldspaths détritiques ainsi que de la chlorite contenus dans ce grès.

Propriétés radiocristallographiques des produits de réaction

Quelques auteurs ont étudié par diffraction des rayons X les produits de la réaction alcalis-silice (Cole *et al.* 1981, Buck et Mather 1978, Oberholster 1983). À ce chapitre, Cole et Lancucki (1983) ont constaté que ces produits présentaient des spectres de diffraction X variables selon le degré de déshydratation qu'avaient subi ces produits depuis leur formation, et que ces modifications étaient irréversibles. Le produit ultime de déshydratation, caractérisé par des espacements principaux de 10.6 et de 8.85 ångströms, fut apparenté par ces auteurs à l'okénite $\text{CaSi}_2\text{O}_5 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Les travaux de Oberholster (1983) sont venus confirmer que des variations d'humidité peuvent effectivement modifier les propriétés radiocristallographiques des produits de réaction.

Le Tableau 5 présente les résultats d'analyses par diffraction des rayons X, (obtenus à l'aide du diffractomètre ou des chambres Guinier ou Debye-Scherrer), de produits de réaction prélevés dans des pores de la pâte de ciment ou sur des surfaces de fracture à travers des granulats de six structures détériorées de la région de Québec. Malgré des provenances très différentes, les produits analysés présentent en commun de nombreux groupes de valeurs d'espacement atomique (d , en ångströms: 10.4-10.6, 8.4-8.5, 6.5, 4.9-5, 3.5, 2.88, *etc.*). Ces résultats se comparent d'ailleurs fort bien à ceux que l'on retrouve dans la littérature (Cole *et al.* 1981, Buck et Mather 1978, Oberholster 1983). Mentionnons de plus que les cinq premiers échantillons analysés ont été prélevés dans des bétons fabriqués avec des granulats calcaires, tandis que dans les deux autres cas, le granulats était un tuf rhyolitique. Les

tallisé dans sa partie supérieure (type 2) tapissant des pores de la pâte de ciment (site A). Echantillon TR-1, échelle linéaire de 100 micromètres. D. Gel recristallisé (type 2) dans sa partie supérieure tapissant un pore de la pâte de ciment (site A). Echantillon TR-1, échelle linéaire de 100 micromètres. E. Gel recristallisé (type 2) à surface botryoïdale et très finement alvéolaire déposé à l'interface pâte de ciment - granulats calcaire (sites B-C). Echantillon CN-2, échelle linéaire de 10 micromètres. F. Vue rapprochée d'un petit bloc du gel recristallisé de la micrographie précédente. A remarquer les fines laminations observées en section. Echelle linéaire de 10 micromètres.

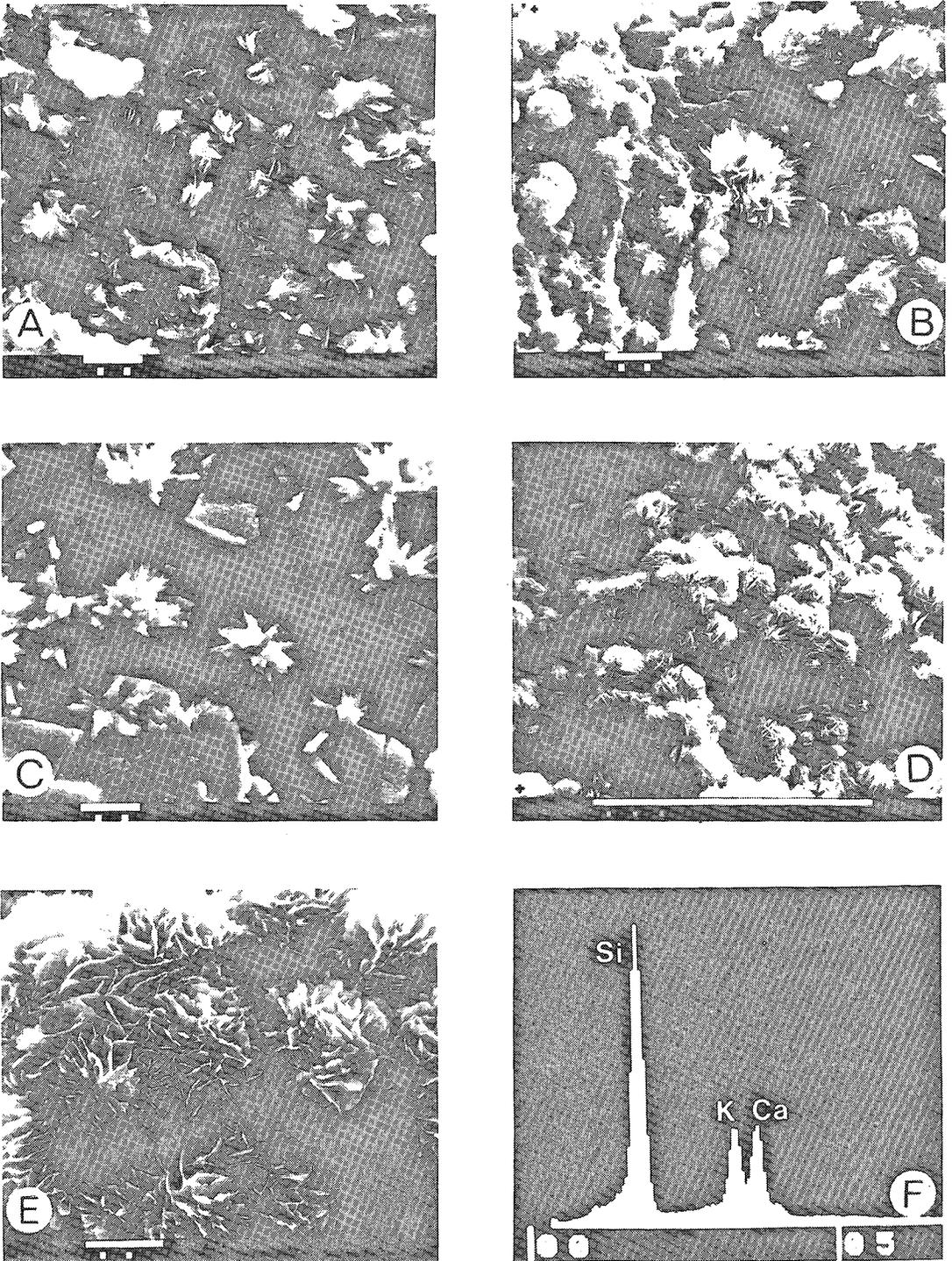


FIG. 4. A. Rosettes lamellaires (type 3) sur une couche de gel déposée sur la surface de fracture d'un granulat calcaire (site C, auréole périphérique foncée). Echantillon TR-2B, échelle linéaire de 10 micromètres. B. Rosette lamellaire (type 3) et globules alumineux (type 5) à surface finement alvéolaire ou lamellaire déposés sur la surface de fracture

granulats présents dans les bétons étudiés dans la littérature étaient également de nature différente. De toute évidence, le type de granulats ne semble pas influencer outre mesure la nature cristallographique et minéralogique des produits cristallins de réaction présents dans les bétons atteints de réactivité alcalis-silice.

Pétrographie des granulats réactifs

Dans les structures de la région de Québec, la plupart des granulats considérés comme réactifs correspondent à des calcaires schisteux et des calcaires fins des types 1) calcilutite à texture de mudstone avec passées de wackestone et 2) calcilutite à texture de mudstone *sensu stricto* (Fournier et Bérubé 1985). Ces calcaires sont majoritairement constitués de grains très fins de carbonates, plus précisément d'un mélange de microsparite de l'ordre de 10 micromètres de diamètre et de micrite. L'analyse chimique de ces calcaires révèle des teneurs en SiO_2 variant entre 7 et 15%, mais l'observation microscopique en lames minces ne permet pas d'associer une part importante de cette silice à des éléments siliciclastiques (feldspath, quartz) (Fournier et Bérubé 1985). Après une légère attaque à l'acide acétique diluée de la surface de petits blocs polis de ce type de granulats, on observe toutefois au microscope électronique à balayage un abondant résidu insoluble à texture très finement alvéolaire (Fig. 5E), constitué surtout de silicium mais aussi d'un peu d'aluminium et de potassium (Fig. 5F). Les alvéoles ont un diamètre d'environ 10 micromètres, ce qui correspond approximativement à la dimension des cristaux de microsparite de la roche. À partir des résultats de l'analyse chimique conventionnelle de ce type de granulats et d'analyses par diffraction des rayons X de son résidu insoluble, on en déduit que ce réseau alvéolaire interstitiel aux carbonates est constitué de quartz et d'argiles dans des proportions d'environ 2:1 (Fournier et Bérubé 1985). Un grossissement poussé de plus de 15,000 × au microscope électronique à balayage ne permet pas de voir la microtexture de cette silice libre qui est donc submicroscopique sans toutefois être amorphe, puisque le spectre de diffraction X obtenu sur le résidu insoluble laissé par ces calcaires révèle une abondance de quartz. À la lumière d'essais normalisés ayant pour but d'évaluer le potentiel de réactivité alcaline de ces granulats, nous croyons fortement que c'est cette

forme de silice qui est à la source du problème rencontré dans les structures étudiées de la région de Québec (Fournier et Bérubé 1985). Cette silicification très finement interstitielle aux carbonates surviendrait très précocement au cours de la diagenèse des sédiments (P.A. Bourque, comm. pers., 1985).

Une seule des 21 structures échantillonnées de la région de Québec contient un autre type de granulats: un grès quartzitique à ciment argileux constitué majoritairement de chlorite (grauwacke). J. Bérard de l'École Polytechnique de Montréal avait déjà attribué la réactivité alcaline à ce granulats (Vézina 1976). D'autres exemples de structures détériorées contenant des granulats de grauweekes ont été rapportés au Canada ou ailleurs (Dolar-Mantuani 1969, 1972, Duncan *et al.* 1973, Gillott et Swenson 1973, Oberholster 1981). La réactivité était généralement associée au type alcalis-silice, sauf par Duncan *et al.* (1973), qui l'ont plutôt attribuée à l'instabilité des minéraux argileux (en particulier la vermiculite) contenus dans ces roches.

Le granulats présent dans les structures étudiées de la région de Trois-Rivières est également un calcaire fin (pelsparite) présentant lui aussi un réseau alvéolaire de silice (et probablement aussi d'argiles), interstitiel aux carbonates (Bérard 1985, Houde, comm. pers., 1985). La réactivité alcaline de cette pierre a toutefois été surtout imputée à l'abondance de fragments de scolécodontes (mâchoires de vers fossiles), de spicules d'éponges et de chert, assez abondants dans le calcaire de la région de Trois-Rivières (membre de St-Casimir). Ces fragments sont constitués de silice considérée comme très réactive. Nous pensons toutefois que la silice finement interstitielle aux carbonates a pu aussi jouer un rôle, puisque c'est la seule forme significative de silice reconnue dans les granulats calcaires réactifs présents dans les structures détériorées de la région de Québec.

Quant à la structure de la Beauce, un barrage déversoir de contrôle du niveau des eaux, elle contient en abondance un tuf rhyolitique à cristaux présentant en lames minces une matrice dévitrifiée riche en quartz microcristallin. Les roches volcaniques à matrice dévitrifiée et leurs équivalents pyroclastiques sont d'ailleurs considérés comme potentiellement réactifs (Dolar-Mantuani 1983). Précisons également que cette structure est soumise à des conditions très sévères d'humidité et qu'elle aurait, par surcroît, été fabriquée avec un ciment riche en alcalis (de l'ordre de 1.2% en équivalent Na_2O). En somme, on

d'un granulats de grès quartzitique contenant de la chlorite et des feldspaths (site intermédiaire D de dépôts blanchâtres). Echantillon VP-12, échelle linéaire de 10 micromètres. C. Touffes fibreuses et radiées (type 4) sur une couche de gel déposée sur la surface de fracture d'un granulats calcaire (site C, auréole périphérique foncée). Echantillon CN-3B, échelle linéaire de 10 micromètres. D. Tapis de rosettes lamellaires (type 3) sur la surface de fracture d'un granulats calcaire (site interne E de dépôts blanchâtres). Echantillon CN-2, échelle linéaire de 100 micromètres. E. Vue rapprochée de rosettes lamellaires. Echantillon CN-3A, échelle linéaire de 10 micromètres. F. Spectre de rayons X (EDXA) des rosettes de la micrographie précédente.

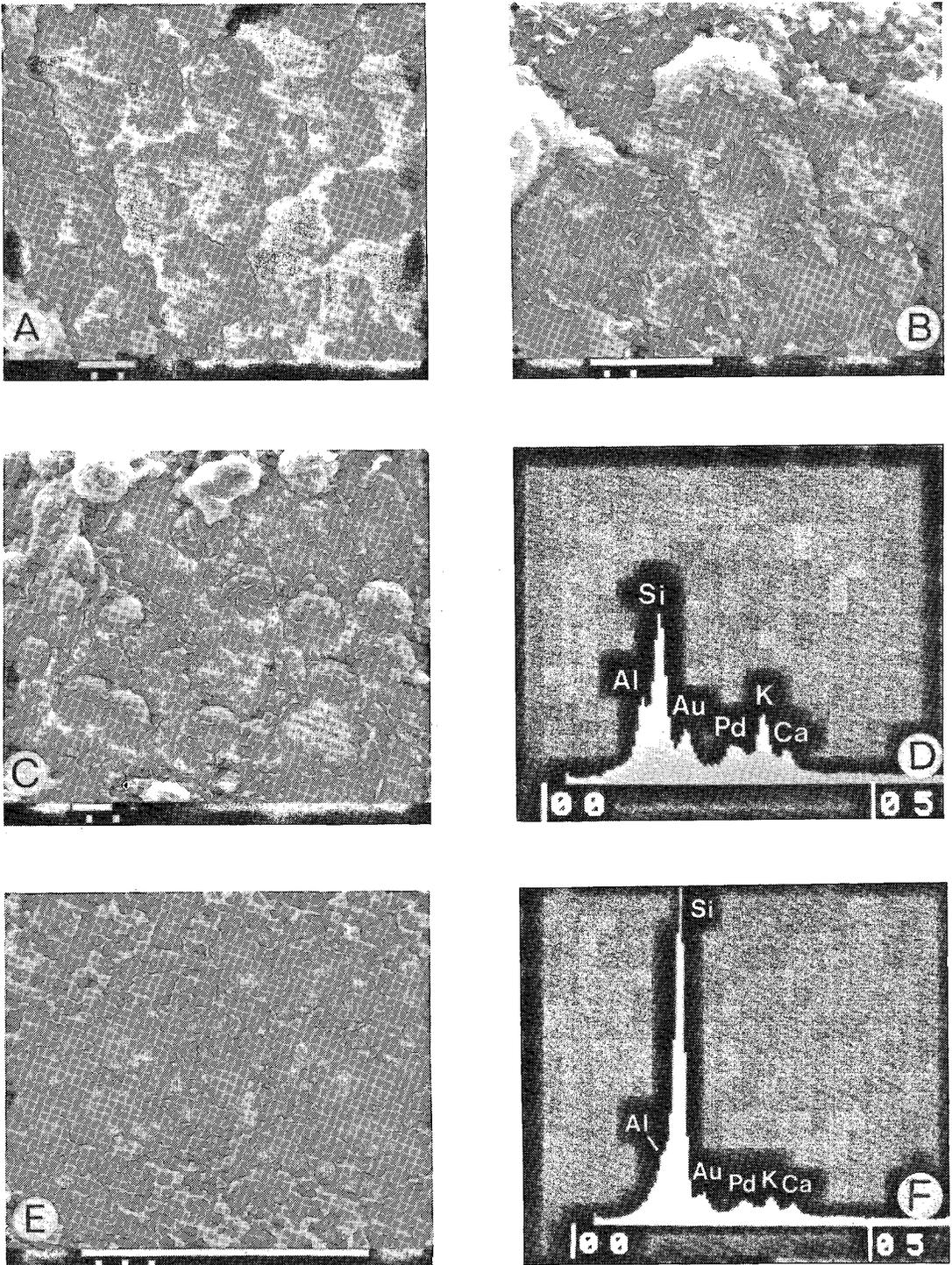


FIG. 5. A. Globules alumineux (type 5) en voie de transformation vers des formes cristallines, surmontés de très fines rosettes lamellaires (type 3) et déposés sur une surface de fracture d'un granulat de grès quartzitique contenant aussi de la chlorite et des feldspaths (site intermédiaire D de dépôts blanchâtres). Échantillon VP-12, échelle linéaire de

trouve là réunies les trois conditions essentielles aux réactions alcalis-granulats.

CONCLUSIONS

Ce travail présente les résultats d'analyses au microscope à balayage (microtexture et composition chimique approximative) et par diffraction des rayons X des produits de réaction alcalis-silice observés dans des échantillons de béton détérioré appartenant à une vingtaine de structures des régions de Québec, de Beauce et de Trois-Rivières.

1. Les produits examinés présentent des textures très variables et ce, dans un même échantillon. On peut les regrouper en deux catégories: des dépôts de gels siliceux (plus ou moins recristallisés) et des dépôts cristallins en forme de rosettes ou de touffes fibreuses et radiées. Il n'est pas possible de relier la morphologie de ces produits avec l'âge de la structure étudiée ainsi que le granulats utilisés, si ce n'est que les gels des plus vieilles structures ont tendance à être plus fortement recristallisés.

2. Sur les surfaces de fracture à travers la pâte de ciment et les granulats, ces produits de réaction présentent une zonation caractéristique du point de vue microtexture. Du côté de la pâte de ciments, des gels à surface régulière ou finement alvéolaire sont généralement présents. Sur la surface de fracture à travers un granulats réactif, et à partir de sa périphérie, on passe de gels à surface unie à des gels à surface de plus en plus irrégulière (botryoïdale, microréni-forme), pour aboutir progressivement ou brusquement à des dépôts cristallins de rosettes lamellaires.

3. La composition chimique des gels varie passablement à l'intérieur d'un même échantillon, et plus encore d'un échantillon à un autre. D'une façon générale, les gels ont tendance à être plus calciques du côté de la pâte de ciment qu'à la périphérie des granulats eux-mêmes. Sur la surface de fracture de ces derniers, les produits de réaction, tout en devenant plus cristallins vers l'intérieur, tendent également à s'enrichir en Si et K par rapport aux gels amorphes périphériques. En coupe, les gels montrent parfois des variations de composition importantes. Pour leur part, les produits cristallins de rosettes lamellaires montrent une composition chimique plus stable, et ce, quelle que soit la nature du granulats réactif en cause.

4. Certains produits amassés, autant sur les surfaces de fracture des granulats que dans les pores de la pâte de ciment, contiennent des phases cristallines caractérisées entre autres par des espacements atomiques de 11 à 12, 10.6 et 8.5 à 8.8 ångströms, que l'on associe à l'okénite ou à son précurseur. Des études supplémentaires seraient néanmoins nécessaires pour confirmer ce point.

5. Les granulats réactifs de la région de Québec et de Trois-Rivières sont des calcaires fins (mudstones) possédant un réseau microscopique alvéolaire de composition siliceuse et argileuse, ainsi que des grès quartzitiques à matrice chloriteuse. Dans la Beauce, des tufs rhyolitiques dont la matrice dévitrifiée contient du quartz microcristallin en abondance se sont également montrés chimiquement instables dans le béton.

REMERCIEMENTS

Nous remercions le personnel du Ministère des Transports du Québec pour leur très précieuse collaboration, et en particulier M. Daniel Vézina. Merci également à J.P. Tremblay et J.C. Chouinard, dont l'aide technique fut grandement appréciée. Ce travail a été subventionné par le fonds FCAR (volet Actions spontanées) du Ministère de l'Éducation du Québec et par le CRSNG.

RÉFÉRENCES

- ARSBERETNING (1969): Beton forsknings laborietet Karlstrup. *BFL Int. Rep.* 225.
- BARONIO, G. (1983): Examples of deterioration by alkalis in Italian concrete structures. *Proc. 6th Int. Conf. Alkalis in Concrete, Research and Practice (Copenhagen, Denmark)*, 503-510.
- (1984): Granulats réactifs aux alcalis en Italie. *Proc. First Int. Conf. Aggregates (Nice, France)*, 183-186.
- BÉRARD, J. (1985): Étude pétrographique de granulats réactifs au Québec. Atelier International sur les réactions alcalis-granulats dans le béton et sur la construction et la réhabilitation de parcs de stationnement étagés en béton (rapport non publié), 25 p.

10 micromètres. B. Fines rosettes lamellaires (type 3) sur des globules alumineux (type 5) à surface très finement alvéolaire et déposés sur la surface de fracture d'un granulats de grès quartzitique (site D). Échantillon VP-12, échelle linéaire de 10 micromètres. C. Globules alumineux (type 5) à texture lamellaire malformée et déposés sur la surface de fracture d'un granulats de grès quartzitique (site D). Échantillon VP-12, échelle linéaire de 10 micromètres. D. Spectre de rayons X (EDXA) des globules de la micrographie précédente. E. Fin réseau alvéolaire de silice obtenu après une légère attaque à l'acide acétique de la surface d'un granulats calcaire réactif de la région de Québec. La dimension des alvéoles fait en moyenne 10 micromètres et correspond à la taille des grains de microsparite qui forment l'ensemble de la matrice de la roche. Échelle linéaire de 100 micromètres. F. Spectre de rayons X (EDXA) du matériel formant le réseau de la micrographie précédente.

TABLEAU 3a. MICROTEXTURES ET COMPOSITIONS CHIMIQUES DES PRODUITS DE REACTION OBSERVÉS**

TYPE DE DÉPÔT	ÉCHANTILLON						
	VP-5	VP-10	VP-12	CN-2	CN-3A	CN-3B	VAL-1
GELS MASSIFS	1a				C: 65/5/30	C: 49/5/47 (2) - 40/5/55 - 57/5/38	B: 67/6/28 (2) - 65/4/31 - 68/7/25
	1b		C: observé	C: 70/6/25 (2) - 56/6/28 - 73/6/21 D: 72/7/21		D: 64/7/29 (rognon) 44/6/50 (creux)	
	1c				D: 70/9/21		
	1d					D: 63/8/29	
GELS RECRISTALLISÉS	2		D: 64/5/31 (rognon) 49/6/45 (creux) E: 65/5/30 (rognon) 45/6/49 (creux)	B-C: 39/5/56 (surface) 43/5/52 (profil recrist.) B-C: 42/4/54 (surface) 42/3/55 (profil recrist.) B-C: 43/3/54 (surface) 20/4/76 (profil recrist.)			A: observé B: 40/3/87 (surface) B-C: 54/4/42 (surface) C: 67/7/26 (surface) 48/10/42 (profil massif)
	3	E: 70/11/19 (tapis)	D: 77/8/15 (sur type 5 et granulat) E: observé (tapis)	E: 68/10/22 (tapis)	E: 74/10/18 (tapis)	E: 82/6/12 (sur granulat) E: 83/7/10 (tapis)	
ROSETTES LAMELL.	4					C: 78/4/18 (sur gel 1a) E: 77/6/17 (sur granulat)	
GLOBULES	5		D: 60/9/7 (3) - 61/8/6 - 56/11/6 - 63/9/8 (*Al ₂ O ₃ : 20-27)				
ETTR-THAUM.*				X			X
CHAUX					X		X
CALCITE							X

TABLEAU 3b. MICROTEXTURES ET COMPOSITIONS CHIMIQUES DES PRODUITS DE REACTION OBSERVÉS**

TYPE DE DÉPÔT	ÉCHANTILLON						
	TR-1	TR-2A	TR-2B	SAR-1A	SAR-1B	SAR-1C	SAR-2
GELS MASSIFS	1a	C: 90/3/7 (2) - 90/3/7 - 90/3/7	A: observé	B: 43/5/52		C: 73/9/18	
	1b						
	1c	C: 89/5/6 (surface) 76/7/17 (profil massif)	C: 72/4/24 (surface)	B: 28/5/67 (2) - 29/5/66 - 27/5/68 (surface)	C: 69/10/21 (surface) 75/9/16 (profil massif)		C: 72/10/18 (surface)
	1d						D: 69/12/19 (surface)
GELS RECRISTALLISÉS	2	A: 55/7/38 (2) - 50/8/42 - 60/6/34 (surface) 48/4/48 (3) - 56/3/41 - 41/4/55 - 47/4/49 (profil massif)		C: observé (+ Cl)	B: 49/4/47 (2) - 65/3/32 - 33/5/62 (surface)		B: 54/5/41 (3) - 58/3/39 - 56/5/39 - 48/7/45 (surface)
	3		C: 81/5/14 (sur gel 1c) E: 76/6/18 (tapis)		D: observé (sur gel 1c) R: observé (tapis)	E: observé (sur granulat) R: 74/12/15 (2) - 74/11/15 - 73/12/15 - 83/10/7 (+ Cl) (tapis)	A: 71/14/15 (tapis) E: 79/12/9 (2) - 75/14/11 - 83/10/7 (sur granulat)
ROSETTES LAMELL.	4						
ETTR-THAUM.*	X		X	X			X
CHAUX	X						
CALCITE							

* ETTR-THAU.: ettringite ou ettringite-thaumasite.

** Résultats donnés en pourcentages massiques SiO₂/K₂O/CaO.

A et B: pâte de ciment (A: pore; B: surface de fracture). C, D et E: surface de fracture d'un granulat (C: auréole foncée périphérique; E: zone interne de dépôts blanchâtres; D: zone intermédiaire entre C et E).

TABLEAU 4. MICROTÉXTURES DES PRODUITS DE RÉACTIONS OBSERVÉS DANS LA LITTÉRATURE

REFERENCE	COUCHES DE GEL				ROSETTES	TOUFFES
	UNI (1a)	BOTRYOÏDAL (1b)	MICROHÉMIIFORME (1c)	RECRISTALLISÉ (2)	LAMELLAIRES (3)	FIBREUSES (4)
Deloye et al., 1982	X	X			X	X
Leroux et Cadot, 1984	X		X			
Oberholster, 1983					X	
Oberholster et al., 1984					X	
Oberholster et Krüger, 1984					X	
Regourd et al., 1978	X				X	
Regourd, 1979			X		X	
Regourd et al., 1981			X		X	
Regourd et al., 1982					X	
Regourd, 1982a		X		X (?)	X	
Regourd, 1982c	X		X			
Regourd, 1983a	X		X			
Regourd, 1983c				X (?)	X	

TABLEAU 5. SPECTRES DE DIFFRACTION X DES PRODUITS DE RÉACTION OBSERVÉS

Pont Samson	CN-2	CN-3A	VP-1A	VP-1B	SAR-1A ₁	SAR-1A ₂	PORTLANDITE	CALCITE	QUARTZ	OKENITE
					F 12.5	F 12.5				
M 10.4	f 10.6	f 12.11 f 11.36	M 10.8 M 9.55	f 10.4		M 10.5				f 10.3
F 8.76	f 9.3	M 9.11								F 8.8
F 8.45	M 8.5	F 8.43	M 8.46	f 8.5	f 8.5	f 8.5				M 7.4 f 6.8
M 6.54	f 6.49	M 6.54	F 6.52	M 6.5	M 6.8	M 6.5				f 6.19 f 5.22
M 4.92		M 4.95	f 4.95	f 4.9	f 5.0	f 5.0	F 4.9			M 4.42 f 4.27 f 3.9
f 3.63	f 3.65	f 3.63	f 3.62					f 3.86	M 4.26	f 3.56
F 3.52	F 3.52	F 3.54	F 3.54	F 3.55	F 3.55	F 3.5				
M 3.33	M 3.48	M 3.32	M 3.3	M 3.45	M 3.45	M 3.3				F 3.34
f 3.21	f 3.16		f 3.25	M 3.3						f 3.34 f 3.22
f 3.08		f 3.08								
F 3.01	M 3.0	F 3.01	f 3.0	f 3.0	f 3.0	f 3.0		F 3.04		F 3.07 F 3.05 M 2.98
f 2.95		M 2.95								F 2.93 f 2.80
F 2.88	F 2.88	F 2.88	F 2.88	F 2.85	F 2.85	F 2.88				M 2.77 f 2.68
f 2.80	f 2.80	f 2.80	f 2.82	f 2.75						f 2.53 f 2.38
f 2.59		M 2.54		f 2.60			F 2.63			f 2.30 f 2.24
	f 2.47	f 2.43						f 2.50	F 2.45	f 2.20 M 2.15
M 2.26	f 2.25	f 2.26	f 2.24					f 2.29	f 2.28	f 1.91
f 2.21	f 2.20	f 2.20								f 1.89
M 2.1	M 2.1	M 2.13	M 2.13	M 2.1	f 2.1			f 2.10		f 1.84 F 1.80
M 1.86	f 1.86						M 1.93			
f 1.83		M 1.83	f 1.83	f 1.82		f 1.8	F 1.80		f 1.81	
f 1.74	M 1.74	M 1.74	M 1.73	M 1.73	f 1.74					

Les raies de diffraction X sont présentées en angströms.
Intensités relatives des raies: F: forte, M: moyenne, f: faible.

Pont Samson: dépôts sous blanchâtres sur surface de fracture d'un granulat.
CN-2: dépôts durs blanchâtres dans des pores de la pâte de ciment.
CN-3A: dépôts sous blanchâtres sur surface de fracture d'un granulat (rosettes).
VP-1A: dépôts sous blanchâtres sur surface de fracture d'un granulat.
VP-1B: dépôts durs blanchâtres dans des pores de la pâte de ciment.
SAR-1A: dépôts blanchâtres dans des pores de la pâte de ciment.
SAR-1A₂: dépôts sous blanchâtres sur surface de fracture d'un granulat.
PORTLANDITE: ASTM X-Ray powder data file, carte no. 11-843.
CALCITE: ASTM X-Ray powder data file, carte no. 1-0828.
QUARTZ: ASTM X-Ray powder data file, carte no. 5-0490.
OKENITE: ASTM X-Ray powder data file, carte no. 9-489.

- _____ & _____ (1978): Alkali-silica reaction products from several concretes: optical, chemical and X-ray diffraction data. *Proc. 4th Int. Conf. Effects of Alkalis in Cement and Concrete (Purdue Univ.)*, 73-85.
- COLE, W.F. & LANCUCKI, C.J. (1983): Products formed in an aged concrete - the occurrence of okenite. *Cement Concrete Res.* **13**, 611-618.
- _____, _____ & SANDY, M.J. (1981): Products formed in an aged concrete. *Cement Concrete Res.* **11**, 443-454.
- DELOYE, F.X., LE ROUX, M.A. & LESAGE, M.R. (1982): Aspects pathologiques à l'interface pâte-granulat. *Colloque Int. RILEM Liaisons Pâte de Ciment - Matériaux Associés (Toulouse, France)* **B**, 1-10.
- DENT-GLASSER, L.S. & KATAOKA, N. (1981a): The chemistry of alkali-aggregate reaction. *Cement Concrete Res.* **11**, 1-9.
- _____ & _____ (1981b): The chemistry of alkali-aggregate reaction. *Proc. 5th Int. Conf. Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (Cape Town, South Africa)*, Pap. S252/23.
- _____ & _____ (1982): On the role of calcium in alkali-aggregate reaction. *Cement Concrete Res.* **12**, 321-331.
- DIAMOND, S. (1975a): Pore solutions and alkali-aggregate attack. *Proc. 2nd Int. Symp. Alkali-Aggregate Reaction - Preventive Measures (Reykjavik, Iceland)*, 165-181.
- _____ (1975b): A review of alkali-silica reaction and expansion mechanisms. 1. Alkalies in cements and in concrete pore solutions. *Cement Concrete Res.* **5**, 329-346.
- _____ (1983): Alkali reactions in concrete pore-solution effects. *Proc. 6th Int. Conf. Alkalis in Concrete - Research and Practice (Copenhagen, Denmark)*, 155-167.
- _____, BARNEYBACK, R.S. & STRUBLE, L.J. (1981): On the physics and chemistry of alkali-silica reactions. *Proc. 5th Int. Conf. Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (Cape Town, South Africa)*, Pap. S252/22.
- _____, YOUNG, J.F. & LAWRENCE, F.V., JR. (1974): Scanning electron microscopy - energy dispersive X ray analysis of cement constituents - some cautions. *Cement Concrete Res.* **4**, 899-914.
- DOLAR-MANTUANI, L. (1964): Expansion of Gull River carbonate rocks in sodium hydroxide. *Highway Res. Record* **45**, 178-195.
- _____ (1969): Alkali-silica reactive rocks in the Canadian Shield. *Highway Res. Record* **268**, 99-117.
- _____ (1972): Harmful constituents in natural concrete aggregates in Ontario. *Proc. 24th Int. Geol. Congress* **13**, 227-234.
- _____ (1983): *Handbook of Concrete Aggregate - a Petrographic and Technological Evaluation*. Noyes Publication, Park Ridge, New Jersey.
- DUNCAN, M.A.G., SWENSON, E.G., GILLOTT, J.E. & FORAN, M.R. (1973): Alkali-aggregate reaction in Nova Scotia. 1. Summary of 5-year study. *Cement Concrete Res.* **3**, 55-70.
- FARRAN, J. (1956): Contribution minéralogique à l'étude de l'adhérence entre les constituants hydratés des ciments et les matériaux associés. *Revue des Matériaux de Construction* **490**, **491**, **492**.
- FIGG, J.W. (1976): Preliminary appraisal of problem areas and reactive aggregates with appropriate preventive measure. *Proc. 3rd Int. Symp. Effect of Alkalies on the Properties of Concrete (Copenhagen, Denmark)*, 245-255.
- _____ (1983): An attempt to provide an explanation for engineers of the expansive reaction between alkalies and siliceous aggregates in concrete. *Proc. 6th Int. Conf. Alkalis in Concrete - Research and Practice (Copenhagen, Denmark)*, 137-144.
- FOURNIER, B. & BÉBURE, M.A. (1985): Caractérisation des granulats calcaires produits dans la région de Québec et évaluation de leur potentiel de réactivité alcaline dans le béton. *Rapport du Groupe de Recherche en Géologie de l'Ingénieur, Université Laval, Québec*, **85-20**.
- FRENCH, W.J. (1976): The role of solvent migration in alkali-silicate reactivity. *Proc. 3rd Int. Symp. Effect of Alkalies on the Properties of Concrete (Copenhagen, Denmark)*, 177-191.
- GILLOTT, J.E. (1975): Alkali-aggregate reactions in concrete. *Engineering Geol.* **9**, 303-326.
- _____ & SWENSON, E.G. (1973): Some unusual alkali-expansive aggregates. *Engineering Geol.* **7**, 181-195.
- GRATTAN-BELLEW, P.E. (1981): Canadian experience of alkali expansivity in concrete. *Proc. 5th Int. Conf. Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (Cape Town, South Africa)*, Pap. S252/6.
- HADLEY, D.W. (1961): Alkali-reactivity of carbonate rocks - expansion and dedolomitization. *Highway Res. Board* **40**, 462-474.
- HANSEN, W.C. (1944): Studies relating to the mechanism by which the alkali-aggregate reaction produces expansion in concrete. *J. Amer. Concrete Inst.* **40**, 213-227.

- HESTER, J.A. & SMITH, O.F. (1956): The alkali-aggregate phase of chemical reactivity in concrete. 2. *Amer. Soc. Testing Materials, Spec. Tech. Publ.* 205.
- HOBBS, D.W. (1978): Expansion of concrete due to alkali-silica reaction: an explanation. *Mag. Concrete Res.* 30 (105), 215-220.
- IDORN, G.M. (1961): Studies of disintegrated concrete. *The Danish National Institute of Building Research and the Academy of Technical Sciences, Committee on Alkali Reactions in Concrete (Copenhagen, Denmark), Prog. Rep.* 2(1).
- _____ (1978): Alkali-silica reactions - simplicity and complicity. *Proc. 4th Int. Conf. Effects of Alkalies in Cement and Concrete (Purdue Univ.)*, 199-215.
- ILER, R.K. (1979): *The Chemistry of Silica*. J. Wiley & Sons, New York.
- KNUDSEN, T. & THAULOW, N. (1975): Quantitative microanalyses of alkali-silica gel in concrete. *Cement Concrete Res.* 5, 443-454.
- KROGH, H. (1975): Reaction of silica and alkalis. *Proc. 2nd Int. Symp. Alkali-Aggregate Reaction - Preventive Measures (Reykjavik, Iceland)*, 132-163.
- LEA, F.M. (1973): *The Chemistry of Cement and Concrete*. Edward Arnold Publishers Ltd., London.
- LENDZER, D & LUDWIG, U. (1978): Alkali-aggregate reaction with opaline sandstone from Schleswig-Holstein. *Proc. 4th Int. Conf. Effects of Alkalies in Cement and Concrete (Purdue Univ.)*, 11-34.
- LEROUX, A. & CADOR, C. (1984): Importance de la pétrographie dans l'approche des mécanismes de la réaction alcalis-granulats. *Proc. First Int. Symp. Aggregates (Nice, France)*, 255-258.
- LONGUET, P., BURGLEN, L. & ZELMER, A. (1973): La phase liquide du ciment hydraté. *Revue des Matériaux* 676, 35-41.
- MASO, J.C. (1980): La liaison entre les granulats et la pâte de ciment hydraté C.R. *Congrès Int. Chimie du Ciment (Paris), Sous-thème VII-I*.
- _____ (1982): La liaison pâte-granulats. In *Le Béton Hydraulique* (M. Regourd, ed.). Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- MASSAZZA, F. & PEZZUOLI, M. (1980): Cement paste - quartz bond in autoclaved concretes. C.R. *Congrès Int. Chimie du Ciment (Paris)*, VII-16-21.
- MATHER, B. (1975): New concern over alkali-aggregate reaction. *Proc. 2nd Int. Symp. Alkali-Aggregate Reaction - Preventive Measures (Reykjavik, Iceland)*, 17-19.
- MCCONNELL, D., MIELENZ, R.C., HOLLAND, W.Y. & GREENE, K.T. (1947): Cement-aggregate reaction in concrete. *J. Amer. Concrete Inst.* 44, 93-128.
- OBERHOLSTER, R.E. (1981): Alkali-aggregate reaction in South Africa - a review. *Proc. 5th Int. Conf. Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (Cape Town, South Africa), Pap.* S252/8.
- _____ (1983): Alkali reactivity of siliceous rock aggregates - diagnosis of the reaction, testing of cement and aggregate and prescription of preventive measures. *Proc. 6th Int. Conf. Alkalies in Concrete - Research and Practice, (Copenhagen, Denmark)*, 419-433.
- _____ (1984): Cracking of concrete resulting from expansive chemical reactions. *Symp. Cracking in Concrete (Port Elizabeth, South Africa)*.
- _____ & KRÜGER, J.E. (1984): Investigation of alkali-reactive, sulphide-bearing and by-product aggregates. *Proc. First Int. Symp. Aggregates (Nice, France)*, 273-277.
- _____, VAN AARDT, J.H.P. & BRANDT, M.P. (1984): Durability of cementitious systems. In *Structure and Performance of Cements* (P. Barnes, ed.). Applied Science Publishers Ltd., Basking, Essex, England.
- POOLE, A.B. (1975): Alkali-silica reactivity from Dhekelia, Cyprus. *Proc. 2nd Int. Symp. Alkali-Aggregate Reaction - Preventive Measures (Reykjavik, Iceland)*, 101-112.
- _____ (1976): Electron probe microanalyses of reaction zones at cement/opal interfaces. *Proc. 3rd Int. Symp. Effect of Alkalies on the Properties of Concrete (Copenhagen, Denmark)*, 163-176.
- POWERS, T.C. & STEINOUR, H.H. (1955): An interpretation of some published researches on the alkali-aggregate reactivity. 1. The chemical reactions and mechanism of expansion. 2. A hypothesis concerning safe and unsafe reactions with reactive silica in concrete. *J. Amer. Concrete Inst.* 51, 497-514, 785-811.
- PRICE, G.C. (1961): Investigation of concrete materials from South Saskatchewan river dam. *Amer. Soc. Testing Materials Proc.* 61, 1155-1179.
- REGOURD, M. (1979): Microstructure de bétons dégradés par la réaction alcalis-granulats. *Annales Chimie, France* 4, 179-185.
- _____ (1982a): La résistance du béton aux altérations physiques et chimiques. In *Le Béton Hydrologique* (M. Regourde, ed.). Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- _____ (1982b): Microstructures et propriétés des ciments, mortiers et bétons. *Ciments, Bétons, Plâtres et Chaux* 734-1/82, 41-48.

- _____. (1982c): Méthodes d'étude de la structure interne des matériaux de construction. *Notes de cours, Paris*.
- _____. (1982d): L'hydratation du ciment Portland. In *Le Béton Hydrolique* (M. Regourde, ed.). Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- _____. (1983a): Altération interne des bétons - la réactivité alcalis-granulats. *Travaux* 577, 62-67.
- _____. (1983b): Durabilité des bétons: cas des granulats réactifs. *Annales de l'Institut technique du bâtiment et des travaux publics, série Matériaux* 59 (413), 128-141.
- _____. (1983c): Methods of examination. *Proc. 6th Int. Conf. Alkalis in Concrete - Research and Practice (Copenhagen, Denmark)*, 275-289.
- _____, HORNAIN, H. & MORTUREUX, B. (1978): Microstructure of concrete in aggressive environments. *Proc. First Int. Conf. Durability of Building Materials and Components (Ottawa)*, 253-268.
- _____, _____, _____, POITEVIN, P. & PEUPORTIER, H. (1982): Altération de la liaison pâte de ciment - granulats dans le béton - la réaction alcalis-granulats. *Proc. Colloque Int. RILEM Liaisons Pâtes de Ciment - Matériaux Associés (Toulouse, France)* B, 17-25.
- _____, _____ & POITEVIN, P. (1981): The alkali-aggregate reaction. Concrete microstructural evolution. *Proc. 5th Int. Conf. Alkali-Aggregate Reaction in Concrete (Cape Town, South Africa)*, Pap. S252/35.
- ROGERS, C.A. (1985): Evaluation of the potential for expansion and cracking due to the alkali-carbonate reaction. *Ministry of Transportation and Communications, Ontario, Report EM-75*.
- SMITH, P. (1964): Learning to live with a reactive carbonate rock. *Highway Res. Record* 45, 126-133.
- _____. (1972): 15 years of living at Kingston with a reactive carbonate rock. *Transportation Res. Record* 525, 23-27.
- STANTON, T.E. (1940): The expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. *Proc. Amer. Soc. Civil Engineers* 66, 1781-1811.
- _____. (1942): Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. *American Soc. Chem. Engineers Trans.* 107, 54-126.
- _____, PORTER, O.J., MEDER, L.C. & NICOL, A. (1942): California experience with the expansion of concrete and reaction between cement and aggregate. *J. Amer. Concrete Inst.* 38, 209-236.
- STRUBLE, L. & DIAMOND, S. (1981a): Unstable swelling behavior of alkali silica gels. *Cement Concrete Res.* 11, 611-617.
- _____ & _____ (1981b): Swelling properties of synthetic alkali silica gels. *J. Amer. Ceramic Soc.* 64, 652-656.
- SWENSON, E.G. & GILLOTT, J.E. (1960): Characteristics of Kingston carbonate rock reaction. *Highway Res. Board, Bull.* 275, 18-31.
- _____ & _____ (1964): Alkali-carbonate rock reaction. *Highway Res. Record* 45, 21-40.
- THAULOW, N. & KNUDSEN, T. (1975a): Quantitative microanalysis of alkali-silica gel in concrete. *Transportation Res. Board, Karlstrup*.
- _____ & _____ (1975b): Quantitative microanalyses of the reaction zone between cement paste and opal. *Proc. 2nd Int. Symp. Alkali-Aggregate Reaction - Preventive Measures (Reykjavik, Iceland)*, 189-203.
- VERBECK, G.J. & GRAMLICH, C. (1956): Osmotic studies and hypothesis concerning alkali-aggregate reaction. *Proc. Amer. Soc. Testing Materials* 55, 1110-1128.
- VÉZINA, R. (1976): Expertise de béton durci - quais 105 et 106, Vieux Port de Québec. *Laboratoire d'expertise et d'essais Inc., Québec (Canada), rapport QB-6136*.
- VIVIAN, H.E. (1983): The process of alkali-aggregate reaction, water adsorption, reacted aggregate swelling, expansion of the mortar on concrete and pozolan behavior. *Proc. 6th Int. Conf. Alkalis in Concrete - Research and Practice (Copenhagen, Denmark)*, 187-194.
- WILDING, L.P., SMECK, N.E. & DREES, L.R. (1977): Silica in soils: quartz, cristobalite, tridymite and opal. In *Minerals in Soil Environments* (J.B. Dixon, F.B. Weed, J.A. Kittrick, M.H. Milford & J.L. White, eds.). *Soil Sci. Soc. Amer.*, 471-552.

Reçu le 3 juin, 1985, révision acceptée le 19 octobre, 1985.