

## Réaction des alcalis du ciment avec les granulats et le verre

par V. Furlan et Y. Houst

Les opinions émises dans cette chronique le sont sous la responsabilité propre des auteurs des articles mais n'engagent pas celle du Laboratoire des matériaux pierreux de l'EPFL.

### 1. INTRODUCTION

En 1940, aux Etats-Unis, la détérioration de certains bétons de Californie a pu être attribuée à la réaction des hydroxydes de sodium et potassium (alcalis) provenant du ciment avec une forme réactive de silice des granulats.

Depuis cette époque, on a montré que de nombreux autres cas d'expansion et de fissuration de bétons dans le monde étaient dus à la même cause.

A notre connaissance, aucun dommage dû à la réaction alcalis-granulats n'est survenu en Suisse. Toutefois, lors de la construction du nouveau barrage de l'Hongrin, des granulats dangereux ont été découverts et les précautions nécessaires ont pu être prises à temps. Par contre, la réaction des alcalis du ciment avec le verre produit souvent des dégâts en Suisse: détérioration et destruction de mosaïques, carreaux, plots, verre à vitre, etc.

Dans les paragraphes suivants, après avoir brièvement expliqué le mécanisme de la réaction alcalis-granulats, nous décrirons les méthodes de test qui permettent de prévoir le danger et examinerons les solutions à appliquer. Quelques cas pratiques seront également présentés.

### 2. RÉACTION ENTRE ALCALIS ET SILICE

A température ordinaire et en milieu aqueux, les alcalis du ciment réagissent avec certaines formes de silice et donnent des composés solubles. Tous les ciments portland contiennent des alcalis sous forme d'oxydes ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ). La teneur en alcalis dépend de l'origine des matières premières et du procédé de fabrication et peut atteindre 1-1,5% de  $\text{Na}_2\text{O}$  équivalent ( $\% \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \times \% \text{K}_2\text{O}$ ). Les ciments actuels ont des teneurs en alcalis souvent plus élevées que les anciens, car les réglemens contre la pollution de l'air conduisent les cimentiers à récupérer les alcalis qui se volatilisent pendant la cuisson du clinker.

Au premier stade de l'hydratation du ciment, les alcalis sont libérés sous forme d'hydroxydes solubles ( $\text{NaOH}$  et  $\text{KOH}$ ), peuvent migrer dans la pâte de ciment et réagir avec certains types de silice des granulats. Les alcalis provenant d'autres sources, telles que l'eau du terrain ou d'adjuvants, ont les mêmes effets que ceux du ciment.

Les types de silice dite réactive se trouvent dans des minéraux tels que l'opale, la calcédoine, la tridymite, la

crystalite, ainsi que dans certaines zéolithes, et dans des roches volcaniques vitreuses et cryptocristallines, telles que rhyolithe et andésites. Ces minéraux et roches ont tous entraîné la détérioration de bétons. L'opale, qu'on trouve dans certains cherts, coquilles et calcaires impurs, est certainement le minéral le plus réactif.

La réaction alcalis-granulats entraîne un gonflement et la fissuration du béton qui peuvent mener à une destruction complète. Le mécanisme de cette destruction n'est pas encore complètement éclairci. La théorie la plus simple attribue l'expansion aux forces développées dans les fragments de granulats attaqués par les alcalis. Ce phénomène est comparable à l'hydratation tardive de la chaux ou de la magnésie dans un béton durci.

La réactivité de la silice dépend de l'arrangement des atomes d'oxygène et de silicium. Dans les formes de silice non réactive comme le quartz, l'arrangement des groupes d'atomes est très régulier, tandis que dans les formes réactives, cet arrangement est irrégulier. Les formes réactives ont une surface interne élevée qui les rend plus sensibles à l'hydratation et à la rupture des liaisons silicium-oxygène. La présence d'alcalis conduit à la formation de gels et à une augmentation de volume. Par absorption d'eau, ces gels peuvent encore gonfler et développer d'importantes forces d'expansion. Les gels formés sont des silicates alcalins comprenant une certaine quantité de chaux ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ). Si la teneur en calcium dans le gel est élevée, il n'a pas de propriété expansive; par contre, si la teneur en calcium est faible, il a des propriétés expansives.

La teneur en silice active à disposition et la concentration locale en calcium et hydroxydes alcalins dans la phase liquide à l'intérieur du béton sont les facteurs déterminant la composition du gel et ses propriétés expansives.

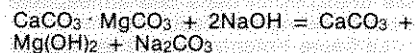
L'hydroxyde de calcium est toujours présent dans le béton durci et sa solubilité décroît de façon marquée lorsque la concentration en hydroxydes alcalins augmente. Comme la composition des silicates dépend du calcium en solution, la formation de gel expansif sera d'autant plus favorisée que la concentration du calcium en solution est faible. Cela a permis de fixer une limite de la teneur en alcalis du ciment portland pour éviter l'expansion. La valeur limite généralement admise est de 0,6% de  $\text{Na}_2\text{O}$  équivalent.

#### Remarque:

Un autre type de réaction expansive dans le béton a lieu en présence d'alcalis et de certains types de calcaires

dolomitiques peu courants, contenant des inclusions d'argile. Toutefois, aucun exemple d'une telle réaction n'a été signalé en Europe. L'humidité est essentielle pour la réaction qui n'a pas lieu dans un béton sec. Les symptômes peuvent apparaître après quelques mois ou plusieurs années. Il n'y a pas d'expansion si le ciment utilisé contient moins de 0,4% de  $\text{Na}_2\text{O}$  équivalent. L'emploi de ciment pouzzolanique, efficace avec les roches siliceuses, n'a guère d'effet dans ce cas.

Le mécanisme de la réaction n'est pas encore entièrement éclairci. On admet qu'en présence d'alcalis il y a dédolomitisation selon la réaction suivante:



L'argile ainsi libérée de son enveloppe dolomitique s'hydrate, gonfle et produit des forces expansives.

### 3. MÉTHODES D'ESSAI ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Des méthodes variées sont proposées pour tester la réactivité potentielle des granulats. Les quatre principales méthodes sont les suivantes:

- examen pétrographique (ASTM\* C295);
- expansion de prismes de mortier (Mortar bar test ASTM\* C227);
- test chimique rapide (ASTM\* C289);
- Pat-test.

#### 3.1. Examen pétrographique

Un pétrographe entraîné peut facilement détecter la présence d'opale ou éventuellement d'autres formes de silice réactive et attirer l'attention sur le danger possible.

#### 3.2. Expansion de prismes de mortier

L'essai d'expansion de prismes de mortier, qui dure couramment de 6 à 12 mois, définit la réactivité potentielle d'un granulat plus clairement que peuvent le faire les autres méthodes. Le ciment et les granulats sont testés dans des conditions d'humidité et de température en accord raisonnable avec les conditions réelles des masses importantes de béton. Le test consiste à mesurer, à intervalles réguliers, l'expansion de prismes de mortier confectionnés avec un rapport ciment/granulat de

\* ASTM = American Society for Testing and Materials.

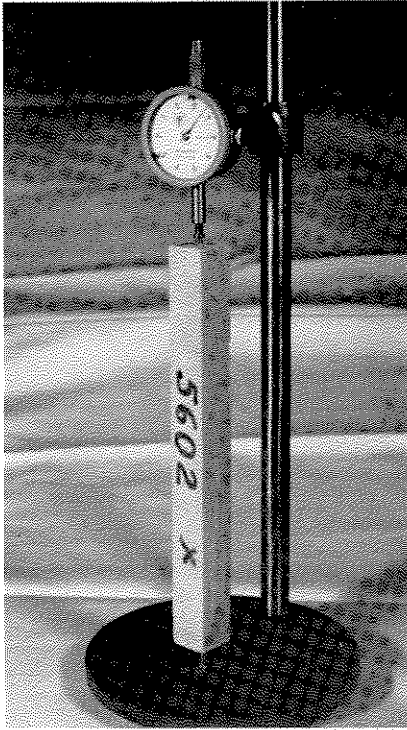


Fig. 1. Mesure de l'expansion d'un prisme de mortier (mortar bar test).

1:2,25, conservés debout dans des boîtes étanches et dans une atmosphère saturée de vapeur d'eau.

La figure 1 montre un de ces prismes dans le dispositif servant à la mesure de

variation de longueur. Si l'expansion est supérieure à 0,10% en 6 mois, ou 0,05% en 3 mois, on considère que le granulat est réactif et que le risque de destruction est élevé. Les expansions dangereuses sont toujours accompagnées d'une dégradation superficielle des prismes qui est nettement visible.

### 3.3. Test chimique

Le test chimique est rapide, car il peut être exécuté en 3 jours.

25 g de granulats, broyés et tamisés, sont placés pendant 24 heures et à 80° C dans 25 ml de solution de NaOH 1N dans des récipients en acier inoxydable étanches à l'air. Sur la solution filtrée, on détermine la silice dissoute (Sc) et la réduction de l'alcalinité (Rc). Les points représentatifs des granulats (valeur de Sc et Rc) sont reportés sur le graphique de la figure 2. Ce graphique définit trois zones séparant les granulats en «dangereux», «potentiellement dangereux» et «inoffensifs».

Les granulats «potentiellement dangereux» sont en général très réactifs, mais ne provoquent qu'une faible expansion s'ils constituent la totalité ou une partie importante du granulat.

### 3.4. Pat-test

Des fragments de granulats sont placés dans une pâte de ciment qu'on laisse durcir dans une atmosphère saturée d'eau. La galette, dont une face a été polie, est immergée dans une solution 1N en alcalis (mélange équimolaire

NaOH et KOH) et conservée à l'abri du gaz carbonique. Chaque jour, la première semaine, puis à plus longs intervalles jusqu'à 28 jours, l'éprouvette est observée afin de détecter tout signe d'attaque.

On admet que les granulats ne sont pas réactifs s'ils ne présentent aucune attaque après 28 jours. Les granulats dangereux montrent, après un certain temps, des signes d'attaque qui se manifestent par l'apparition de gel blanchâtre, d'une dissolution partielle et même totale des fragments. La figure 3 montre une éprouvette de Pat-test avec des fragments d'opale après 28 jours de conservation dans la solution alcaline. On constate que les fragments ont été presque entièrement dissous.

## 4. PRÉCAUTIONS À PRENDRE

Le choix d'un granulat, non réactif, est certainement le meilleur moyen pour éviter les dégâts causés par les alcalis. Pour dépister un éventuel danger, il est donc nécessaire d'évaluer la réactivité des granulats avant leur utilisation. Des contrôles périodiques sont même souhaitables pour les dépôts de sables et graviers dont les caractéristiques peuvent varier de façon significative. Quand cela est possible, il est donc recommandé de remplacer les granulats douteux par d'autres non réactifs dont le comportement est bien connu.

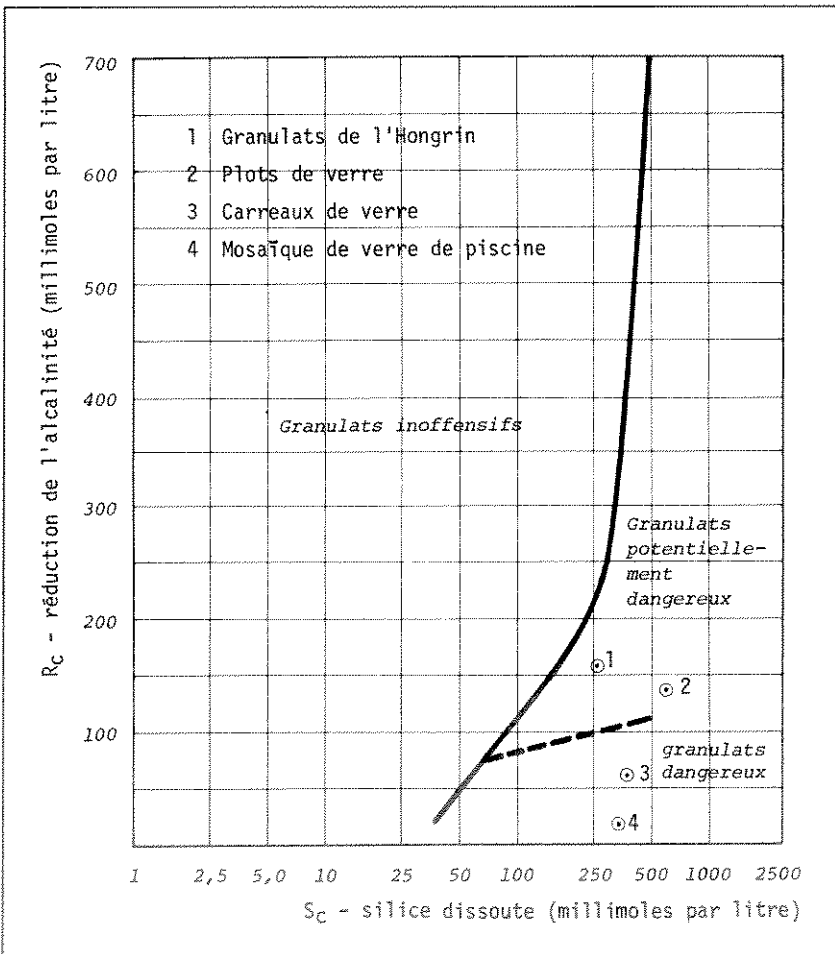
Dans certaines régions, tous les granulats à disposition sont réactifs et les considérations économiques imposent leur emploi pour les constructions locales. Dans ces conditions, l'emploi d'un ciment à basse teneur en alcalis (inférieure à 0,6% de Na<sub>2</sub>O équivalent pour un CP et à 2% pour un ciment de haut-fourneau avec plus de 65% de laitier) est indispensable si l'on veut assurer une bonne durabilité des ouvrages. S'il s'agit de constructions importantes, dont la durée de vie attendue est longue, la teneur en alcalis du ciment doit être aussi basse que possible, de préférence inférieure à 0,4% de Na<sub>2</sub>O équivalent.

L'adjonction de pouzzolane ou de trass en remplacement d'une partie du ciment assure, sous certaines conditions, une garantie supplémentaire. Toutefois, l'adjonction de tels matériaux convient surtout aux constructions massives, puisque la pouzzolane réduit la vitesse de durcissement et augmente le retrait du béton.

Les pouzzolanes ont une double action; d'une part celles à faible teneur en alcalis réduisent effectivement la teneur en alcalis du mélange, et d'autre part elles fixent préférentiellement les ions hydroxydes (OH<sup>-</sup>) formés lors de l'hydratation du ciment. Les pouzzolanes sont plus réactives que les granulats grâce à leur surface spécifique beaucoup plus élevée. La plupart des alcalis ne réagissent donc pas avec les granulats réactifs. Le choix de la pouzzolane doit être fait avec attention, car certaines peuvent contenir beaucoup plus d'alcalis solubles que n'importe quel ciment portland!

Les conditions climatiques ont une notable influence sur l'expansion. Par exemple, le béton d'un ouvrage exposé à une atmosphère sèche tend à perdre de l'eau libre, ce qui empêche la réaction. La température augmente de façon significative la vitesse des réactions. A basse température, les vitesses de réaction et l'expansion sont très faibles, tan-

Fig. 2. Graphique permettant d'évaluer la réactivité des granulats selon le test chimique rapide.



dis qu'elles peuvent être élevées à 60-70° C. Certains granulats réputés sans danger réagissent tout de même à température élevée.

Toute modification qui conduit à une augmentation du volume des vides du béton tend à diminuer l'expansion. Une augmentation importante (>7%) des pores relativement grands évite l'expansion en donnant suffisamment d'espaces aux produits de réaction. Des bulles d'air entraîné ne produisent pas de pores suffisamment grands pour empêcher le gonflement. On a constaté que les dosages faibles, les rapports E/C bas, le faible compactage, les granulats d'argile expansée réduisent l'expansion. L'influence de ces différents facteurs explique pourquoi des bétons médiocres, confectionnés avec des granulats réactifs, se comportent tout à fait convenablement, bien qu'aucune précaution n'ait été prise.

## 5. QUELQUES EXEMPLES TIRÉS DE LA PRATIQUE

### 5.1. Béton

Lors d'une visite du site de la carrière prévue pour la construction du nouveau barrage de l'Hongrin, le professeur J.-P. Daxelhofer a remarqué dans la roche calcaire des rognons et des couches de silix susceptibles de réagir avec les alcalis du ciment; il a suggéré d'entreprendre une étude. Le test chimique rapide a montré que le silix était potentiellement réactif (voir point représentatif 1 sur la figure 2).

Les essais effectués sur des prismes de mortier, confectionnés avec le granulat en question et le ciment portland à disposition, ont confirmé le danger d'expansion. Face à un tel risque, il a été décidé exceptionnellement d'ajouter une pouzzolane au ciment portland.

### 5.2. Verre

Si le danger demeure exceptionnel en Suisse dans le cas du béton, il n'en est pas de même pour le verre. En effet, les attaques de verre sont relativement fréquentes, mais comme ces cas ne mettent pas en danger des structures et des ouvrages importants, ils sont peu connus, tout en ayant parfois des conséquences financières non négligeables.

De nombreux verres réagissent avec les alcalis du ciment en présence d'eau. Le processus d'attaque peut conduire dans certains cas à leur destruction totale. Les verres contiennent généralement une très forte proportion de silice à l'état amorphe. Avec les alcalis, cette silice a un comportement analogue à celle des autres formes naturelles qu'on peut rencontrer dans les granulats réactifs.

Nous avons eu l'occasion d'observer plusieurs cas d'attaque de plots de verre utilisés dans la fabrication d'éléments de béton dit «translucide». La figure 4 montre un détail de cette attaque qui s'est naturellement produite au contact avec le mortier des joints. Les résultats du test chimique rapide sont reportés sur le graphique de la figure 2 (point 2) et montrent que le verre est réactif. Les dégâts constatés se sont toujours produits en présence d'une forte humidité. L'emploi d'un ciment à basse teneur en alcalis a effectivement permis d'éviter la réaction. Actuellement, les fabricants de tels éléments recouvrent la tranche des plots d'un film de matière plastique qui évite ainsi le contact direct du mortier avec le verre.

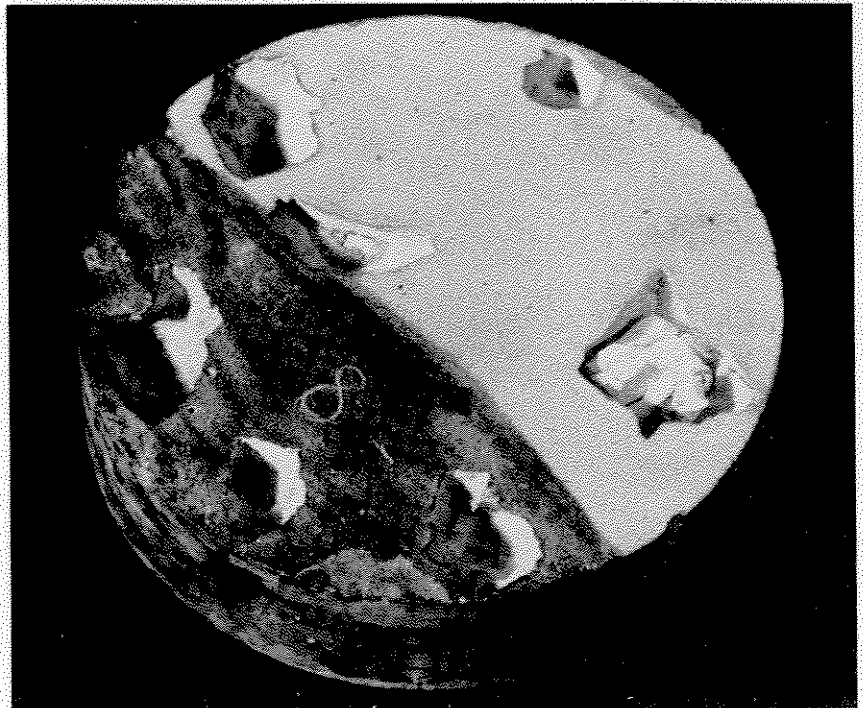


Fig. 3. Fragments d'opale enrobés de pâte de ciment (« Pat-test »). Après 28 jours, les granulats sont presque entièrement dissous.

Dans les cas exposés à l'humidité, il est tout de même conseillé d'utiliser un ciment à basse teneur en alcalis.

Des dégâts du même type se sont également produits avec des matériaux de revêtement tels que carreaux et mosaïque en verre. Un exemple de carreaux en verre opale altéré est visible sur la figure 5. Les carreaux avaient été posés sur un lit de mortier de CP ordinaire très dosé. La forme des altérations est très typique de la réaction du verre et des alcalis. Le résultat du test chimique rapide, reporté sur le graphique de la figure 2, montre que le verre est réactif (point 3).

L'attaque de petites mosaïques de verre est souvent limitée à l'interface avec le mortier et se manifeste par des décollements. Parfois, la réaction est plus importante et produit un véritable éclatement des petits carreaux. Un tel exemple est visible sur les figures 6 et 7. Il s'agit dans ces cas d'un revêtement de piscine extérieure, cinq ans après la pose. Des mesures ont dû être prises car l'état d'altération entraînait des risques de blessure pour les utilisateurs. Le verre s'est également révélé réactif (point 4 de la figure 2). L'éclatement en lamelles est probablement favorisé par des défauts et tensions internes qui

Fig. 4. Dégradation par les alcalis d'éléments en verre d'un «béton translucide».





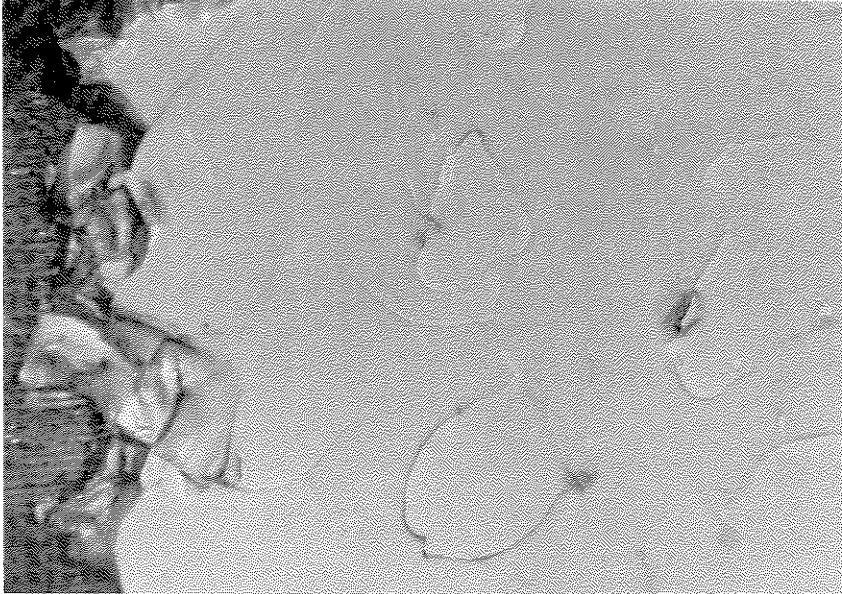


Fig. 5. Altération typique d'un carrelage en verre opale posé avec mortier de CP.

favorisent la diffusion et l'attaque des alcalis dans des plans préférentiels. Pour éviter les dégâts, la pose de carreaux et mosaïques de revêtement particulièrement exposés à l'eau doit être faite avec des mortiers au ciment à basse teneur en alcalis ou avec des adhésifs à base de résines synthétiques.

D'autre part, nous pouvons encore citer de nombreux exemples de verres à vitre altérés par des coulures de lait de ciment ou d'eau de délavage de mortiers et bétons. Les alcalis et la chaux provoquent dans ce cas une attaque

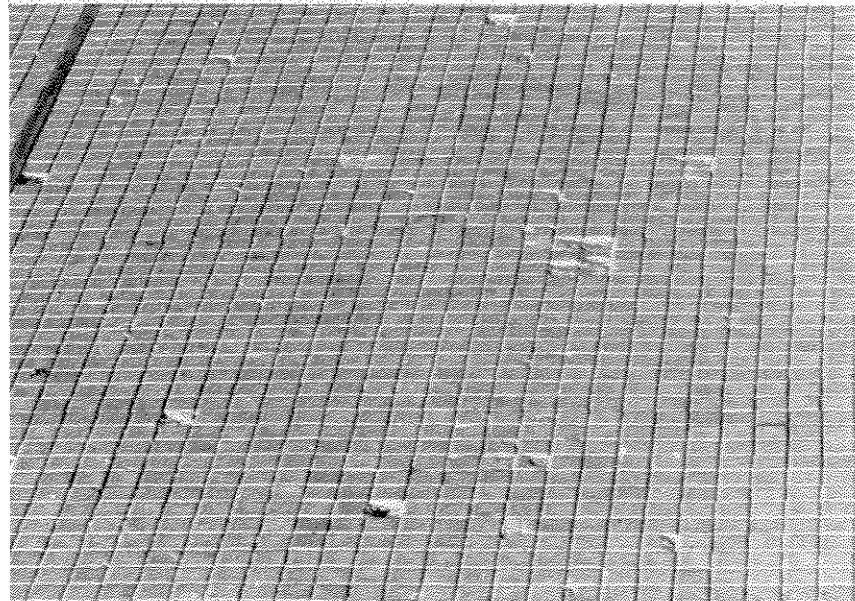
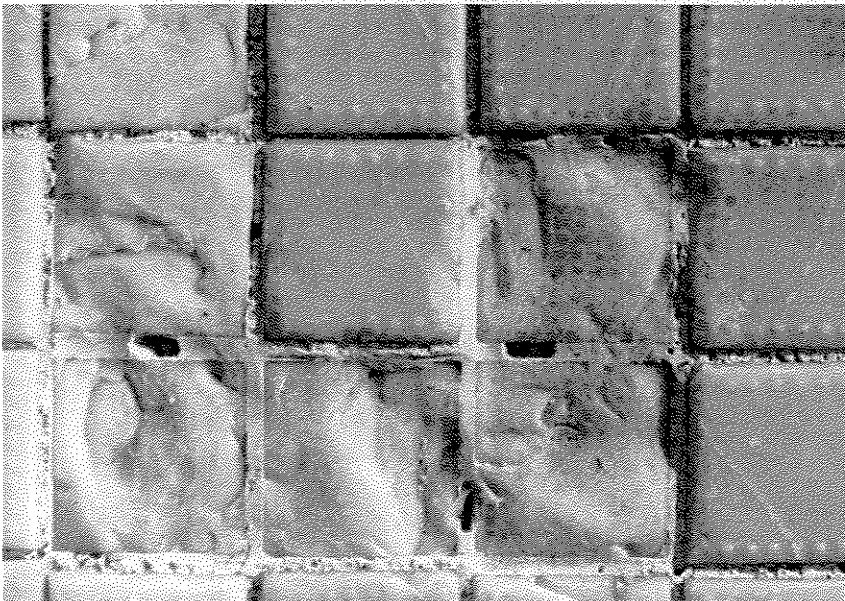


Fig. 6. Revêtement de sol en mosaïque en verre d'une piscine. Etat de dégradation après 5 ans.

Fig. 7. Détail de la figure 6: éclatement des petits carreaux de verre de 2,5 x 2,5 cm posés sur mortier de CP.



superficielle qui entraîne le ternissement et l'irisation du verre. Ces dégâts sont fréquents surtout dans les bâtiments en construction.

## CONCLUSION

Le danger de la réaction alcalis-granulats est peu probable en Suisse. Cependant, lors de l'utilisation de granulats inconnus et douteux, il est conseillé de procéder à quelques vérifications. Par contre, à l'étranger, les risques de réactivité sont nettement plus élevés, par exemple au Moyen-Orient où, pour des ouvrages importants, on ouvre de nouvelles carrières.

Les attaques de verre (plots, carreaux, mosaïque, etc.) sont relativement fréquentes, mais pourraient être facilement évitées en prenant les précautions nécessaires.

Dans tous les cas douteux, où il y a un danger potentiel, il est indispensable d'effectuer des essais et analyses sur les matériaux qui seront utilisés.

## RÉFÉRENCES

- Lea, F. M.: The Chemistry of Cement and Concrete, Ed. Arnold, 3th Ed., Glasgow (1970), p. 569-578.
- Symposium on Alkali: Aggregate Reaction Preventive Measures, Reykjavik, August 1975, 270 pages.
- French, W. J., Poole, A. B.: Alkali, aggregate reactions and the Middle East Concrete, 10, (1), 1976.
- ASTM: Petrographic examination of aggregates for concrete, C 295-65, Part 14, Philadelphia (1975), p. 206-213.
- Idem: Potential alkali reactivity of Cement aggregate combinations (Mortar-bar Method), C 227-71, p. 141-146.
- Idem: Potential reactivity of aggregates (Chemical method), C 289-71, p. 186-194.
- Jones, F. E., Tarleton, R. D.: Reactions between aggregates and Cement. Part 6, Nat. Building Studies Res. Paper 25 HMSO, London (1958), p. 19-22.