

Deux cas d'attaque de bétons par les sulfates

Y. Houst, chimiste au LMP

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

Le problème de l'attaque des bétons de ciment Portland par les sulfates est en général connu des praticiens et des projecteurs. Toutefois, on croit que le risque d'attaque est peu fréquent et limité à certaines régions, ou à certains types de sols et de roches; par conséquent, l'étude de la nature des eaux et des sols en contact avec le béton est souvent négligée. En réalité, on peut rencontrer des eaux et des sols dangereux un peu partout en Suisse romande. L'imprévoyance peut entraîner des dégâts très graves et parfois mettre en danger l'existence des ouvrages.

Après avoir rappelé brièvement les processus d'attaque et de destruction des bétons et mortiers de CP par les sulfates et les moyens pour y remédier, nous décrirons, dans cet article, deux cas de dégradation constatés lors d'expertises.

2. INFLUENCE DE LA COMPOSITION DU CIMENT SUR LA RÉSISTANCE AUX SULFATES

2.1. CP ordinaire

Le clinker de CP est obtenu par cuisson d'un mélange convenablement dosé de calcaire et d'argile. Ces matériaux contiennent essentiellement du calcium, silicium, aluminium et fer, que l'on peut écrire sous la forme d'oxydes CaO, SiO₂, Al₂O₃ et Fe₂O₃. En réagissant lors de la cuisson, ces composés se combinent pour donner quatre nouveaux composés qui sont:

- le silicate bicalcique 2 CaO·SiO₂ ou C₂S;
- l'aluminate tricalcique 3 CaO·Al₂O₃ ou C₃A;
- l'alumino-ferrite tetracalcique 4 CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃ ou C₄AF.

Le CP est obtenu par mouture du clinker et d'un peu de gypse qui est ajouté pour régulariser la prise.

Lorsque le ciment est gâché avec de l'eau, il y a formation de composés hydratés. Un schéma simplifié de l'hydratation est donné à la figure 1.

On remarque que C₃A réagit avec le gypse, normalement présent dans le ciment à raison de 4 à 5 % pour donner un sulfo-aluminate hydraté: ettringite ou sel de Candlot. Ce composé expansif se forme aux dépens de l'alumine à l'état non dissous. Etant donné que la solubilité de l'alumine diminue en présence de chaux, il est évident que la réaction est favorisée par une haute teneur en chaux. Cette réaction n'a aucune conséquence néfaste si elle a lieu avant le durcissement. Par contre, elle est néfaste si le béton est durci; en effet, comme le ciment n'est que partiellement hydraté dans un béton durci, un nouvel apport de sulfate par l'eau en contact avec le béton permet à la réaction de se produire. Si l'eau contient du sulfate, sous forme de sulfate de sodium, potassium et magnésium, la réaction a quand même lieu. Le sulfate de calcium se forme par échange de sodium, potassium et magnésium contre le calcium qui est présent sous forme de chaux libérée par l'hydratation des deux silicates.

La susceptibilité des ciments à l'attaque des sulfates est au moins connue depuis le XVIII^e siècle (avant la mise au point du CP actuel!). Vicat, Le Chatelier, Férét et d'autres ont déjà effectué des

recherches approfondies sur ce sujet au siècle passé (réf. 1). Depuis le début de ce siècle, la littérature relative à l'attaque des ciments par les sulfates a pris un énorme développement qui continue actuellement, ce qui suggère que le problème est extrêmement complexe et qu'il reste de nombreux points à éclaircir.

On admet généralement que les bétons et mortiers de CP de bonne qualité ne sont pas altérés par les eaux contenant moins de 200 mg/l SO₄²⁻. La limite est de 2000 mg SO₄²⁻ par kg pour les sols (voir tableau 1).

2.2. Ciment à résistance élevée aux sulfates

Un moyen pour augmenter la résistance aux sulfates des CP est de remplacer C₃A par C₄AF.

La substitution de l'alumine par l'oxyde de fer a été d'abord suggérée par Le Chatelier à la fin du siècle passé. En 1920, Ferrari en Italie, a produit un ciment avec un rapport Al₂O₃/Fe₂O₃ inférieur à un. Ce ciment est souvent connu en Europe sous le nom de ciment Ferrari. C'est le ciment qui est appelé chez nous *ciment Portland à résistance élevée aux sulfates*, CPHS (réf. 2). Le clinker est produit en Suisse dans une seule usine. Il est fabriqué avec les mêmes matières premières que le CP, mais avec adjonction d'oxyde de fer (Fe₂O₃). Ce ciment a une bonne résistance aux sulfates, mais il n'est pas invulnérable. Des recherches ont montré depuis longtemps que la résistance des CP aux attaques des sulfates dépend d'abord de la teneur en C₃A, puis ensuite de celle en C₄AF. Ce dernier composé, qui ne réagit que lentement, est susceptible de se décomposer et de donner du C₃A qui peut, à long terme, réagir avec le sulfate. On peut donc dire que plus les teneurs en C₃A et C₄AF sont faibles, meilleure est la tenue du ciment. Ces teneurs ne peuvent pas être trop abaissées, car la cuisson du clinker à relativement basse température exige la présence d'oxyde de fer et d'alumine qui agissent comme fondants.

On admet, généralement, que les bétons et mortiers de CP à résistance élevée aux sulfates et de bonne qualité, résistent dans les eaux et les sols considérés comme faiblement agressifs (voir tableau 1).

2.3. Autres ciments résistant aux sulfates

Ciment pouzzolanique et de trass

Ces ciments sont un mélange de CP et de pouzzolane ou trass. Les pouzzolanes et trass, d'origine volcanique, ont

- le silicate tricalcique 3 CaO·SiO₂ ou C₃S;

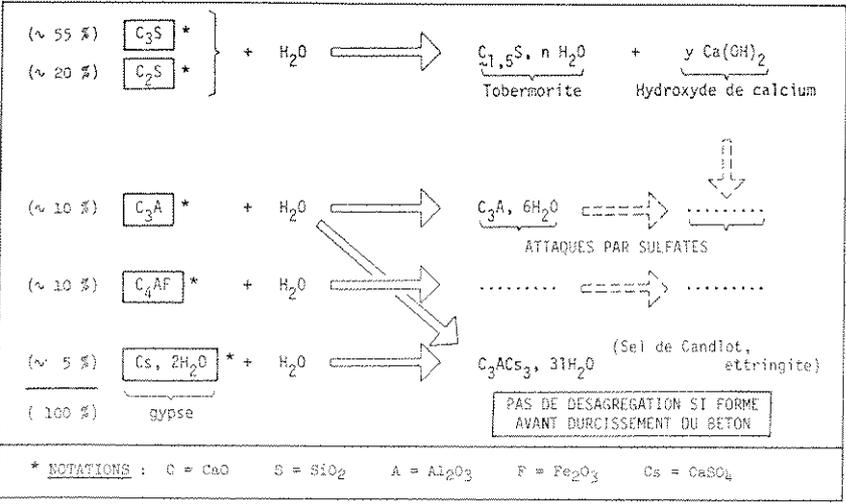


Fig. 1. Hydratation du ciment Portland.

Degré d'agressivité	Concentration en sulfates		Type de ciment
	dans le sol mg SO ₄ ⁻⁻⁻ par kg de sol séché à l'air	dans l'eau mg SO ₄ ⁻⁻⁻ / litre	
négligeable	< 2000	< 200	CP ordinaire
faible	2000 à 5000	200 à 600	CPHS ciment pouzzolanique, de haut-fourneau (35 à 85 % laitier)
fort	plus de 5000	600 à 1500	CPHS ciment de haut-fourneau (plus de 50% laitier)
très fort	-	plus de 1500	ciment permétallur- gique, Fouilloux ou alumineux

Des exigences quant à la perméabilité à l'eau du béton, au rapport E/C, de la résistance et du type de protection éventuelle sont également à prendre en considération.

Pour des conditions sévères (par exemple sections minces, sections soumises à une pression hydrostatique d'un seul côté, sections partiellement immergées), il faudra réduire le rapport eau-ciment E/C et augmenter le dosage en ciment s'il est nécessaire d'améliorer la maniabilité du béton pour assurer un parfait compactage et une perméabilité minimum du béton.

Tableau 1. Ciment à choisir en fonction du degré d'agressivité des eaux et des sols.

une structure vitreuse et la propriété de réagir avec la chaux et les alcalis pour donner des hydrosilicates et hydroaluminates dont les caractéristiques sont semblables à celles des composés hydratés du CP.

Comme ces ciments contiennent une quantité réduite de CP et donc de C₃A, ils ont une résistance accrue aux sulfates. On considère généralement que les bétons confectionnés avec ces ciments résistent aux milieux faiblement agressifs (voir tableau 1).

Ciment de haut-fourneau

Ce ciment est obtenu par mélange homogène de laitier basique de haut-fourneau et de CP. L'adjonction de laitier varie de quelques pourcents à plus de 85%. Dans ce dernier cas, on parle de ciment permétallurgique ou de laitier au clinker Portland. Par l'adjonction de laitier on diminue également la teneur en C₃A et C₄AF du ciment et ces ciments ont par conséquent une bonne tenue aux sulfates. On admet généralement que les ciments de haut-fourneau contenant plus de 35% de laitier résistent aux milieux faiblement agressifs et les ciments permétallurgiques aux milieux fortement agressifs (voir tableau 1).

Ciment Fouilloux

Ce ciment est obtenu par mélange de clinker de CPHS, de laitier et de pouzzolane. Il réunit donc les avantages de ces trois ciments. Le ciment Fouilloux à durcissement lent est à peu près indestructible et convient particulièrement aux milieux fortement et même très fortement agressifs (voir tableau 1).

Ciment alumineux

On l'appelle aussi fondu, car il est obtenu par fusion complète de mélan-

ges de bauxite et de calcaire. Ce ciment contient généralement de l'aluminate monocalcique (CA), du silicate bicalcique et d'autres aluminates et silicoaluminates. Par contre, il ne contient pas de C₃A et a donc une excellente résistance aux sulfates. On peut l'utiliser dans les milieux très fortement agressifs (voir tableau 1).

3. AUTRES FACTEURS DE DESTRUCTION PAR LES SULFATES

Une autre action de destruction des sulfates est à prendre en considération: c'est la cristallisation du gypse, en tant que tel, ou produit à partir d'un sulfate quelconque et de la chaux dans les pores du béton. Dans certaines conditions, la pression de cristallisation ou l'augmentation du volume due à la formation du gypse provoque déjà une désagrégation du béton.

4. DESCRIPTION DE DEUX CAS D'ATTAQUE PAR LES SULFATES

4.1. Premier cas

Description de la situation et des dégâts

Une galerie d'adduction d'eau potable a été percée à travers un massif comportant de fortes masses d'anhydrite, de gypse et de schistes calcaires à rognons pyriteux. Dans son rapport, le géologue écrit que le ciment devra résister aux eaux sulfureuses et recommande l'emploi d'un ciment Portland à résistance accrue aux sulfates.

La galerie a été construite en 1960 en utilisant du ciment Portland à résistance accrue aux sulfates, ciment normalisé et portant actuellement le nom

de ciment Portland à résistance élevée aux sulfates, CPHS (réf. 2).

Le béton a été mélangé à sec en plaine, transporté en camion jusqu'à l'entrée de la galerie, malaxé avec de l'eau et mis en place dans des conditions malaisées (place réduite et mauvais éclairage, radier bétonné avant les parois sur marin réglé, bétonnage en présence de venues d'eau, béton transporté en wagon normal, le profil coffré ne permettant plus le passage d'un wagon malaxeur, mise en place difficile aux endroits blindés).

Des dégâts sont apparus assez vite et ont nécessité en 1970 une réfection partielle de la chape. Les dégradations ont continué et le laboratoire des matériaux pierreux de l'EPFL a été consulté en 1975. Les dégâts suivants ont été constatés:

a) En de nombreux endroits, la chape du radier est complètement altérée (fig. 2). Là où la chape avait été réparée, elle est, cinq ans plus tard, de nouveau détruite. Dans les zones attaquées, la chape se détache en morceaux qui se désagrègent facilement. Les destructions les plus importantes ont lieu dans la zone de contact entre la chape et le radier en béton. Le mortier a perdu toute cohésion et se présente comme une pâte à teinte blanchâtre (fig. 3).

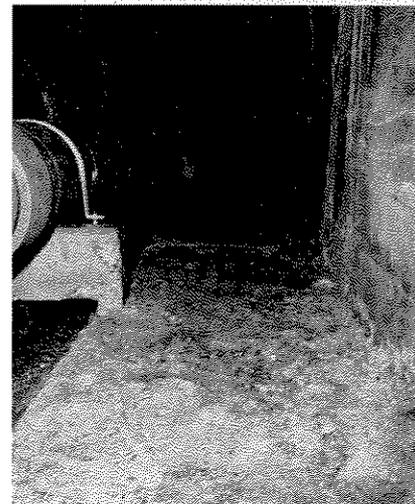


Fig. 2. Vue de la galerie d'adduction d'eau et de l'attaque de la chape en mortier.

b) Malgré l'aspect parfois inquiétant du béton des pieds droits, la plupart des dégradations sont limitées à une profondeur dépassant rarement 6 cm. Il s'agit soit d'un décollement de plaques de béton altéré à l'interface de rupture, soit d'un ramollissement superficiel. Le ramollissement complet du béton n'a été constaté qu'en quelques endroits où un burin a pu être enfoncé sans peine jusqu'à une profondeur de 27 cm. La figure 4 montre l'aspect du béton attaqué.

c) Les supports de la conduite qui ont été construits en usine avec un béton en CP normal, sont fortement attaqués et ont tendance à se désagréger (fig. 5). Ils ont été changé au fur et à mesure des besoins.

Analyses et essais de laboratoire

L'importance et l'étendue des dégâts nous ont conduits à effectuer de nombreux essais et analyses de laboratoire dont notamment des

- analyses d'eaux;
- analyse de bétons et mortiers: dosage, teneur en sulfate;
- résistance mécanique;
- porosité;
- examen microscopique de ciment.

Les analyses d'eau ont montré que dans toutes les zones d'altération, l'eau est toujours fortement chargée en sulfates, les teneurs varient de 1139 à 1466 mg/l de SO_4^{--} et sont à considérer comme très agressives pour les bétons de CP. La plupart de ces eaux contiennent surtout du sulfate de calcium ($CaSO_4$), mais cependant, dans un échantillon, le sulfate est sous forme de sulfate de sodium. Etant donné la nature des terrains traversés, la composition de ces eaux n'est pas surprenante.

Les teneurs en ciment et sulfates, les porosités des bétons ainsi que la résistance moyenne à la compression, déterminée sur des cubes sciés dans de grands échantillons, sont données dans le tableau 2.

On remarque que les dosages des bétons sont de 295 et 297 kg/m^3 de CP pour les pieds droits avec des résistances à la compression de 526 et 426 kg/cm^2 et de 252 kg/cm^3 de CP pour le radier avec une résistance à la compression de 280 kg/cm^2 . Pour déterminer si le béton d'origine a subi un apport extérieur en sulfate, 3 échantillons de béton altéré (A) et à titre comparatif, 3 échantillons de béton apparemment intact (B) ont été analysés. Si le rapport SO_3/SiO_2 soluble est supérieur à 0,16, on doit admettre que le béton s'est enrichi en sulfates par un apport extérieur. Les résultats obtenus montrent que les bétons altérés ont une teneur en sulfate plus de quatre fois supérieure à la teneur maximum admissible.

La détermination des porosités, obtenues par imbibition d'eau sous vide, donne des valeurs de 12,7% pour les bétons des pieds droits et de 13,7% pour le béton du radier. Si l'on considère un béton frais, plastique, de diamètre maximum de 30 mm et dosé à 300 kg/m^3 de ciment avec une teneur en air de 1,5%, un calcul simple montre que la porosité est de l'ordre de 13%. On peut en conclure que le béton apparemment sain a des caractéristiques normales au point de vue de sa porosité et que le béton du radier est un peu plus poreux que celui des pieds droits.

Comme de nombreux indices tendaient à montrer que nous étions en présence d'une attaque de béton au CP par les sulfates et que le ciment employé devait être de type Ferrari, normalement résistant aux sulfates, nous avons effectué un examen microscopique du liant pour éclaircir ce dernier point.

Cet examen a montré que le ciment utilisé était bien de type Ferrari et de bonne qualité. D'après les restes anhydres, on peut notamment estimer que sa teneur en C_3A est de l'ordre de 1%. De ce point de vue, sa composition est normale (réf. 2). Nous avons encore remarqué que, dans les zones altérées, la proportion de C_4AF a nettement diminué. Ces zones, à fort agrandissement, montrent une multitude de petits cristaux en forme d'aiguille qui ressemblent fortement à des cristaux d'ettringite.

Causes d'altération

Les essais effectués sur le béton ont montré que malgré les conditions difficiles de mise en œuvre, le béton était de bonne qualité. Le dosage en ciment est

de 300 kg/m^3 pour les pieds droits et de 250 kg/m^3 pour le radier.

La dégradation du béton est toujours liée à la présence de sulfates. Il faut donc considérer les sulfates comme le facteur d'altération principal.

L'examen microscopique a montré que le ciment avait une teneur négligeable en C_3A . Par contre, C_4AF , présent à raison d'environ 10%, a partiellement réagi et formé de nouveaux composés. Cette réaction, accompagnée d'expansion, a provoqué la destruction et le ramollissement du béton.

Les décollements, plutôt superficiels, sont vraisemblablement dus à la cristallisation du gypse dans les pores du béton. On peut donc conclure que le ciment de type CPHS ou Ferrari n'a pas résisté dans les conditions sévères de cette galerie.

De plus, un dosage en ciment relativement faible (pieds droits) et trop faible (radier) a certainement favorisé l'attaque du ciment qui aurait certainement beaucoup mieux résisté si le béton avait été plus étanche. Ce dernier point sera développé plus loin.

4.2. Second cas

Des bassins de rétention en béton de CP ont été construits autour d'un réservoir de carburant. Les bassins, qui sont à environ 4 mètres au-dessous du niveau du sol, sont construits dans d'anciens remblais. Environ deux ans après la construction, des infiltrations sont apparues en un seul endroit bien délimité. On a alors constaté en un endroit que le béton n'avait pratiquement plus de résistance et qu'il avait subi un ramollissement en profondeur.

Ces constatations nous ont conduit à effectuer une analyse de l'eau d'infiltration. On a trouvé une teneur en sulfates de 1935 mg/l qui est à considérer comme fortement agressive pour un béton de CP. L'analyse du béton altéré et du béton sain a montré que le rapport SO_3/SiO_2 soluble était respectivement de 0,87 et de 0,12. Il ressort donc clairement que le béton altéré a une teneur en sulfates plus de cinq fois supérieure à la teneur maximum admissible (voir 4.1.).

On a ainsi pu conclure que le béton au ciment Portland normal a subi une attaque par les sulfates. On voit donc qu'il vaut la peine de s'assurer de la



Fig. 3. Détail de l'attaque de la chape en mortier.

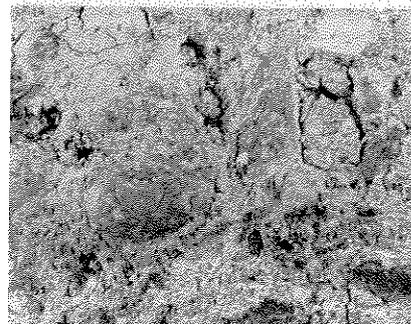


Fig. 4. Aspect du béton attaqué.

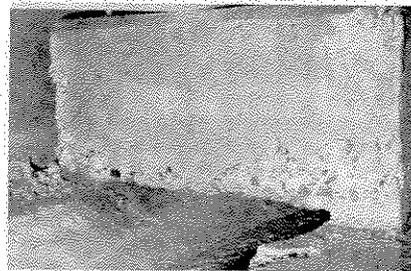


Fig. 5. Aspect d'un support en béton de CP, attaqué.

composition de remblais avant d'effectuer une construction. On a supposé que dans le cas présent, d'importantes quantités de plâtre avaient été dissoutes par l'eau d'infiltration qui a pénétré dans un point faible du béton (nid de gravier, discontinuité...) où les sulfates ont réagi avec le ciment Portland normal.

béton type	dosage (kg/m^3)	SO_3/SiO_2 soluble	porosité %	résistance à la compression (kg/cm^2)
A (1)	*	0,75	*	*
A (2)	*	0,64	*	*
A (3)	*	1,11	*	*
B (1)	297	0,07	12,7	526
B (2)	295	0,09	12,7	426
B (3)	252	0,06	13,9	280

* = non déterminés à cause du manque de résistance des échantillons

A = béton altéré B = béton apparemment sain

Tableau 2. Caractéristiques du béton.

5. CONFECTION DE BÉTONS RÉSISTANT AUX SULFATES

5.1. Choix du ciment

Pour confectionner un béton résistant aux sulfates, il faut naturellement choisir un ciment résistant aux sulfates. Le choix dépend de l'agressivité du milieu et peut se faire sur la base des recommandations données dans le tableau 1, dont les indications sont valables pour les bétons en contact avec des eaux presque neutres de pH 6-9 contenant des sulfates naturels, mais exempts de substances agressives tels que les sels d'ammonium et de magnésium. Le béton fabriqué avec du ciment alumineux peut être utilisé jusqu'à un pH de 4.

Une température élevée, une haute pression ou un renouvellement de l'eau (coefficient de perméabilité des sols $k > 10^{-5}$ m/s) augmentent le degré d'agressivité de celle-ci.

Ces recommandations sont basées sur les expériences que nous avons pu faire et ne correspondent pas forcément aux recommandations et règlements en vigueur dans d'autres pays. Pour des renseignements plus complets, on peut consulter les ouvrages de Lea et Biczök (réf. 3 et 4).

Cependant, pour confectionner un béton résistant aux sulfates, il ne suffit pas de choisir un ciment adéquat, mais il faut encore que le béton soit le plus compact et étanche possible.

5.2. Confection de bétons compacts et étanches

Lorsqu'un béton est exposé à des actions agressives, il est essentiel qu'il soit compact et imperméable. En effet, il ne faut en aucun cas faciliter la pénétration de l'eau qui véhicule les agents agressifs à l'intérieur du béton. Ces règles sont donc valables pour la confection de tous les bétons en contact avec des eaux agressives. Les granulats sont généralement plus compacts et moins perméables que la pâte de ciment durcie. Il faut donc s'efforcer de réduire d'une part la quantité de pâte liante utilisée et d'autre part la porosité de la pâte liante elle-même.

Examinons d'abord la question de la réduction de la quantité de la pâte liante. C'est le problème de la composition granulométrique du béton. Pour obtenir un béton complet, il est indispensable que les granulats aient une composition granulométrique appropriée. Il ne suffit pas d'effectuer au début du chantier une étude de composition, il faut encore contrôler que la composition prescrite soit effectivement réalisée pendant toute la durée du chantier. Il est presque indispensable de disposer d'au moins trois composantes: sable fin, sable grossier et gravier bien lavés.

Considérons maintenant la composition de la pâte liante. La quantité d'eau strictement nécessaire pour l'hydratation purement chimique du ciment Portland est de l'ordre de 20% du poids du ciment, mais ces réactions ne peuvent pas avoir lieu si les produits d'hydratation ne forment pas un gel dans lequel se trouve une quantité d'eau adsorbée, physiquement liée, égale elle aussi, à 20% environ du poids du ciment. Cela signifie que, si l'on veut que toute l'eau de gâchage ait théoriquement la possibilité de se fixer en partie chimiquement et en partie physiquement au ciment, il faut que le rapport eau sur ciment, E/C, soit inférieur ou égal à 0,4 (C/E 2,5).

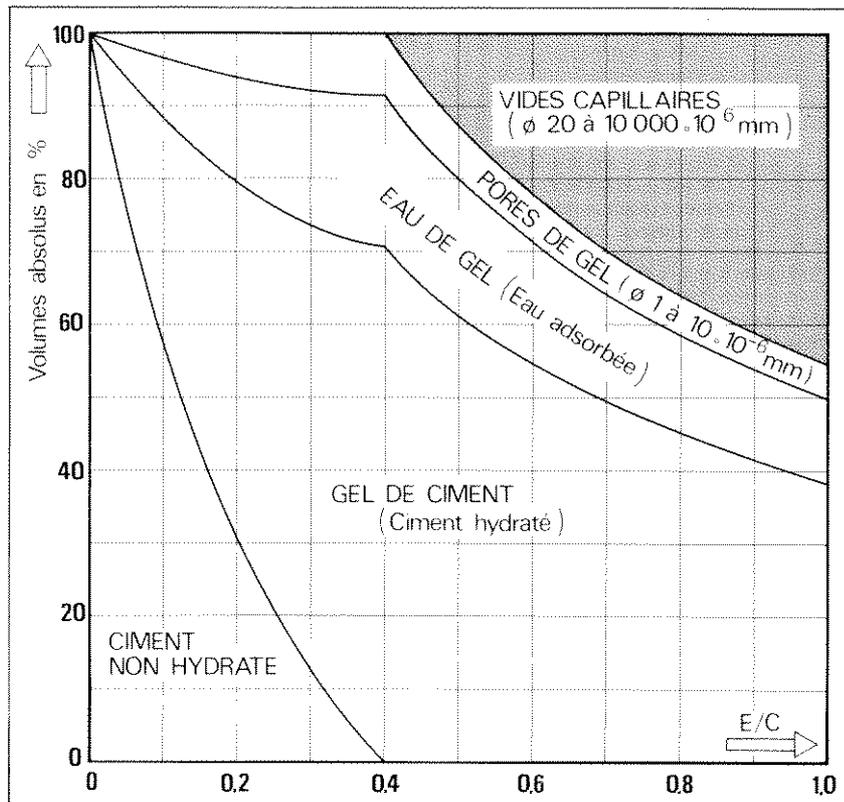


Fig. 6. Composition en volumes absolus de pâtes liantes pures de ciment hydraté en fonction du rapport E/C (d'après réf. 5 et 6).

Avec les dosages courants en ciment de 300 kg/m³ et en eau de 160 à 180 litres/m³, les rapports E/C sont de l'ordre de 0,53 à 0,60 (C/E = 1,89 à 1,67). On est donc bien loin du rapport E/C théorique de 0,40. L'eau en excès produit des vides capillaires dont les dimensions sont de 100 à 1000 fois supérieures à celles des pores qui se forment à l'intérieur du gel au moment de l'hydratation du ciment (voir fig. 6). Si cela n'est pas trop gênant pour les bétons courants, ce l'est beaucoup plus pour les bétons exposés à l'action des eaux sulfatées, car la présence des vides capillaires rend le béton perméable. Il est donc essentiel de réduire le pourcentage de ces vides, ce qui signifie que le rapport E/C doit être voisin de 0,4 (ou C/E voisin de 2,5). Comme on ne peut pas réduire trop la quantité d'eau, car il faut que le béton conserve une maniabilité satisfaisante, il est nécessaire d'augmenter le dosage en ciment jusque vers 400 kg/m³ environ.

Des renseignements pratiques et théoriques plus complets ont été donnés récemment par F. Alou (réf. 7).

6. CONCLUSION

Le risque d'attaque des bétons de ciment Portland, bien qu'en général connu, est souvent négligé et des dégâts importants peuvent en résulter.

Ce risque est souvent plus élevé qu'on ne le croit en Suisse romande, où le danger peut survenir un peu partout. Il vaut donc la peine de consulter les cartes géologiques et de se renseigner sur la nature des eaux, des roches et des sols dans lesquels un ouvrage va être construit. Si l'on constate des venues d'eau lors de fouilles et de sondages, il est recommandé d'en faire effectuer une analyse par un laboratoire spécialisé. On obtiendra ainsi, rapide-

ment, non seulement des renseignements sur son agressivité vis-à-vis des bétons en général, mais également sur son pouvoir incrustant (formation de dépôts calcaires).

Il existe de nombreux ciments spéciaux résistant aux sulfates, que l'on choisit en fonction du degré d'agressivité déterminé par l'analyse. La confection d'un béton de haute qualité doit également être étudiée.

Les deux exemples d'attaque de bétons que nous avons décrits montrent l'importance des précautions à prendre pour éviter tout inconvénient et assurer la durabilité des ouvrages.

RÉFÉRENCES

- (1) BOGUE R.H. *La chimie du ciment Portland*, Eyrolles, Paris (1952).
- (2) Norme SIA 215 (1978).
- (3) LEA F.M. *The chemistry of Cement and Concrete*, Edward Arnold, Glasgow (1970), 3^e édition.
- (4) BICZÖK. *Concrete Corrosion, Concrete Protection*, Akadémiai Kiado, Budapest (1972).
- (5) CZERNIN W. *Zementchemie für Bauingenieure*, Bauverlag, Wiesbaden (1977).
- (6) WESCHE K. *Baustoffe für tragende Bauteile*, tome 2, Bauverlag, Wiesbaden (1974).
- (7) ALOU F. *Etanchéité à l'eau des constructions, rôle de la qualité du béton dans «Contributions actuelles à la physique du bâtiment et à l'aspect architectural des constructions en béton, Séminaire 2, 31 octobre 1978, EPFL»*, organisé par la Société suisse des fabricants de ciment, chaux et gypse, Talstrasse 83, 8001 Zurich. 19 pages.