

Ciments et bétons

Composition, propriétés et utilisations

par Micheline MORANVILLE
Département Génie Civil - ENS de Cachan - 94230 Cachan

Le ciment et son principal dérivé, le béton, sont des matériaux de grande diffusion, connus de longue date. Les Romains ont mélangé de la chaux et des cendres volcaniques de Pouzzoles pour la construction du Panthéon. Le ciment pouzzolanique existe toujours. Le ciment industriel date du siècle dernier après que Vicat eut fixé la composition des matières premières à savoir 80 % de carbonate de calcium, 20 % de silice. Apsdin a donné ensuite le nom de Portland à ce ciment artificiel qu'il considérait comme proche de la pierre calcaire de l'île de Portland.

Dans les deux dernières décennies, des matériaux nouveaux sont apparus sur le marché, les superplastifiants et la fumée de silice, entre autres. Le béton a dû s'adapter à des exigences nouvelles dans la construction des réacteurs de centrale nucléaire, des ponts en encorbellement, des plates-formes pétrolières en mer. Des ouvrages d'art aussi audacieux qu'esthétiques, tel le pont de Normandie, incorporent des bétons de hautes performances dont la composition et le comportement ont été optimisés dans le Projet National de Recherche Les Voies Nouvelles du Matériau Béton par les chimistes, les physiciens du solide, les mécaniciens et les ingénieurs de structure, qui ont travaillé en étroite collaboration.

1. LES CEMENTS

1.1. Fabrication du ciment Portland

Le ciment Portland est produit à partir d'un mélange de calcaire (80 %) et d'argile (20 %), porté à une température de 1450°C puis trempé. Les différentes étapes de la fabrication comprennent l'extraction des matières premières, leur mélange, la cuisson, le broyage, le conditionnement et le transport. La cimenterie est agencée autour d'une salle de contrôle informatisée. Le produit obtenu est le clinker.

1.2. Constitution du ciment Portland

Le clinker est constitué de silicate tricalcique Ca_3SiO_5 , silicate dicalcique Ca_2SiO_4 , d'aluminate tricalcique $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ et d'aluminoferrite de calcium $\text{Ca}_2\text{AlFeO}_5$. Les cimentiers ont adopté pour plus de simplicité une notation fondée sur la composition en oxydes dans laquelle $\text{C} = \text{CaO}$, $\text{S} = \text{SiO}_2$, $\text{A} = \text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{F} = \text{Fe}_2\text{O}_3$. Ainsi les constituants du clinker sont :

- silicate tricalcique, $\text{Ca}_3\text{SiO}_5 = 3\text{CaO}$, $\text{SiO}_2 = \text{C}_3\text{S}$,
- silicate dicalcique, $\text{Ca}_2\text{SiO}_4 = 2\text{CaO}$, $\text{SiO}_2 = \text{C}_2\text{S}$,
- aluminate tricalcique, $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6 = 3\text{CaO}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{C}_3\text{A}$,
- aluminoferrite tétracalcique, $2(\text{Ca}_2\text{AlFeO}_5) = 4\text{CaO}$, Al_2O_3 , $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{C}_4\text{AF}$.

Les deux silicates forment environ 80 % du mélange (en masse), soit 50 à 60 % de C_3S , 30 à 20 % de C_2S . Les aluminates qui constituaient la phase liquide à la température de clinkérisation et qui ont cristallisé entre les silicates au refroidissement (figure 1) se partagent les autres 20 %, avec en moyenne 8 à 10 % de C_3A .

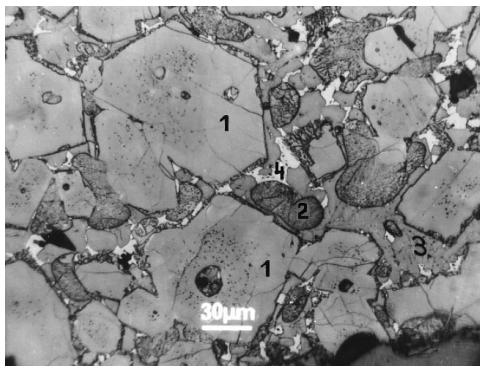


Figure 1 : Micrographie d'une section polie de clinker.

1. Silicate tricalcique - 2. Silicate dicalcique.
3. Aluminate tricalcique - 4. Aluminoferrite.

Le ciment Portland est composé de clinker auquel est ajouté du gypse (3 à 5 %), au moment du broyage. Le gypse est un régulateur de prise.

1.3. Hydratation du ciment Portland

D'après la norme NF P 15-301 : 1994, «le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une matière inorganique finement moulue qui, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité, même sous l'eau».

Dès le contact avec l'eau, ont lieu à l'interface solide-liquide, des réactions complexes dont on peut analyser la cinétique en prenant en compte les mécanismes élémentaires de l'adsorption, l'hydrolyse, la dissolution, la diffusion, la cristallisation.

1.3.1. Hydratation des silicates

Les deux silicates donnent les mêmes hydrates mais le silicate tricalcique réagit plus vite que le silicate dicalcique.

Cinq étapes sont généralement admises dans la cinétique de l'hydratation du silicate tricalcique. Elles sont calquées sur la courbe calorimétrique obtenue au calorimètre à conduction thermique. Ces cinq étapes correspondent à :

- *réaction initiale* : l'effet thermique est rapide et bref. Il utilise moins de 1 % de C_3S . En fait, dans la première minute, la surface des grains est un site d'échanges continuels entre solide et solution. Le silicate se dissout et forme un premier hydrate de rapport Ca/Si voisin de 1. Cet hydrate primaire se combine avec les ions Ca^{2+} de la solution en un hydrate secondaire de rapport Ca/Si voisin de deux ;
- *période d'induction* : elle dure plusieurs heures. Sa très faible activité correspond à une croissance limitée de l'hydrate secondaire. Elle est aussi appelée période dormante ;
- *période d'accélération* : le dégagement important de chaleur traduit un taux de réaction élevé. L'hydrate secondaire se réorganise en un hydrate de rapport Ca/Si proche de 1,7. Ce silicate nommé C-S-H ($C = CaO$, $S = SiO_2$, $H = H_2O$), précipite à partir de la solution. Cette solution est elle-même sursaturée en calcium d'où la précipitation de $Ca(OH)_2$ que les cimentiers appellent portlandite ;
- *période de décélération* : la croissance du flux thermique est due au facteur limitant qu'est la diffusion des réactants et de la silice en particulier, au travers des hydrates ;
- *réaction finale* : la décroissance du flux thermique est très étalée. Cette période est aussi un processus de diffusion contrôlée. L'hydratation peut se poursuivre pendant des années ou rester inachevée.

A l'observation microscopique, le silicate hydraté C-S-H se présente en fibres (figure 2). La portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ cristallise en plaquettes hexagonales empilées entre les grains de ciment hydratés.

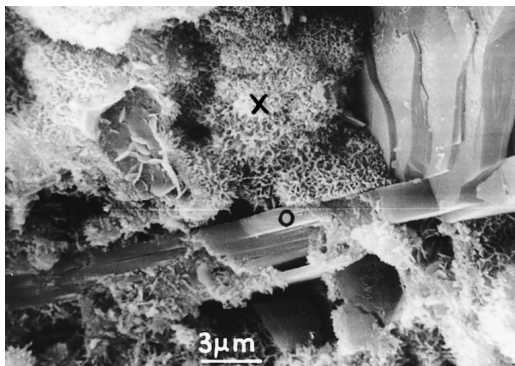


Figure 2 : C-S-H (x) et portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (o) dans une pâte de silicate tricalcique durcie.

1.3.2. Hydratation des aluminates

Les deux aluminates donnent les mêmes hydrates, par simple substitution Al-Fe , mais l'aluminate tricalcique s'hydrate plus rapidement que l'aluminoferrite.

Dans le système aluminate-eau, la précipitation des hydrates est immédiate. Il se forme d'abord un gel $\text{Al}(\text{OH})_3$ puis une série d'aluminates hexagonaux. Dans l'hydratation du clinker, ces aluminates précoces se déposent sur les silicates, entraînant une rigidification hâtive et un retard à la précipitation des C-S-H. Aussi les cimentiers utilisent-ils un régulateur de prise. C'est le gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. La séquence de formation des sulfoaluminates comprend l'apparition du trisulfoaluminate de calcium $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6, 3\text{CaSO}_4, 31\text{H}_2\text{O}$ ou AFt ou ettringite, puis du monosulfoaluminate de calcium $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6, \text{CaSO}_4, 12\text{H}_2\text{O}$ ou AFm, enfin d'une solution solide AFm- $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_7, 13\text{H}_2\text{O}$.

A l'observation microscopique, le trisulfoaluminate apparaît en fibres dispersées (figure 3) et le monosulfoaluminate en cristaux hexagonaux (figure 4).

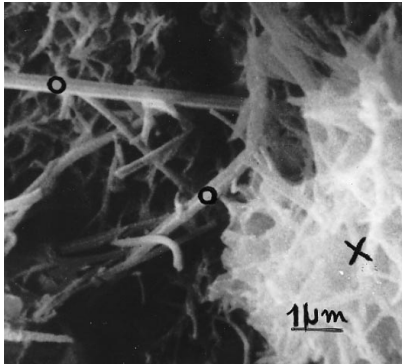


Figure 3 : Ettringite (o) et C-S-H (x) dans un ciment Portland à sept jours.

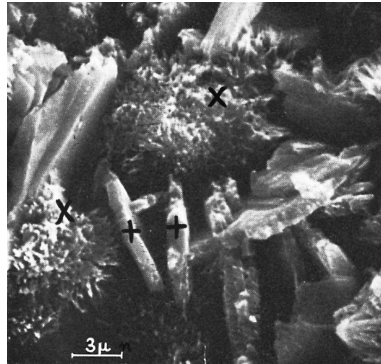


Figure 4 : Monosulfoaluminate (+) et C-S-H (x) dans un ciment Portland à quatre-vingt-dix jours.

1.3.3. La solution interstitielle

Dès le gâchage du ciment, l'eau devient multiforme. Elle peut être libre dans les pores capillaires entre les hydrates, adsorbée à la surface des solides, combinée dans les premiers hydrates.

L'eau libre est, dès les premiers instants, fortement ionisée. Son analyse chimique, après extraction par compression, montre la présence d'ions Ca^{2+} , K^+ , SO_4^{2-} , OH^- . La concentration en alcalins est très élevée, directement corrélée avec la concentration en OH^- . A dix minutes, la concentration en OH^- est de 0,10 mole/kg, ce qui correspond à un pH de 13. La concentration en ions Ca^{2+} est faible à cause de l'insolubilité de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ en milieu très alcalin.

1.3.4. Bilan de l'hydratation

Une pâte de ciment, de rapport eau/ciment = 0,5 (en masse), dont les minéraux du clinker sont complètement hydratés, sans échange avec l'extérieur, est constituée de :

- 86 % d'hydrates : 50 % C-S-H, 20 % $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 16 % sulfoaluminates,
- 7 % d'eau libre,
- 7 % de vide.

Les 7 % de vide correspondent à la porosité qui se décompose en pores des hydrates (de l'ordre de 0,3 nm de diamètre) et pores capillaires interhydrates (de quelques centaines de nanomètre à un millimètre de diamètre, suivant le rapport eau/ciment).

La porosité est caractérisée par la taille des pores, leur connexité et la tortuosité de leur réseau. La théorie de la percolation, appliquée au transfert des fluides dans les milieux mal connectés, implique l'existence d'un diamètre critique d_c ou diamètre minimal des pores géométriquement continus. Pour un rapport eau/ciment = 0,4, le diamètre critique d_c est de 100 nm à trois cent vingt jours dans un ciment Portland.

1.3.5. Phénomènes physiques de l'hydratation

La formation des hydrates entraîne un retrait, un dégagement de chaleur, une auto-dessiccation :

- *la contraction Le Chatelier* : le volume des hydrates est inférieur à la somme des volumes du ciment et de l'eau. La différence varie de 10 à 14 % du volume initial, suivant la composition du ciment ;
- *le retrait de dessiccation* : le retrait de dessiccation le plus important correspond au départ de l'eau adsorbée ;
- *la chaleur d'hydratation* : les réactions d'hydratation sont exothermiques. La quantité de chaleur dégagée, en moyenne, par l'hydratation d'un gramme de ciment de Portland, en vingt-huit jours est de quatre cents à cinq cents joules qui se répartissent entre silicates et aluminates, étudiés séparément, de la manière suivante :
 - silicate tricalcique : cinq cent deux joules,
 - silicate dicalcique : cent quatre-vingt neuf joules,
 - aluminat tricalcique : huit cent cinquante-sept joules,
 - aluminoferrite tétracalcique : deux cent neuf joules.

Les mesures calorimétriques montrent que l'hydratation du silicate tricalcique et de l'aluminat tricalcique n'évolue pas sensiblement entre vingt-huit jours et six mois alors que le silicate dicalcique et l'aluminoferrite tétracalcique continuent à s'hydrater progressivement.

2. LES BÉTONS

2.1. Composition du béton

Le béton est constitué de ciment, d'eau, de sable et de granulats, malaxés pour obtenir un mélange homogène. Les masses volumiques des composants vont de 1 (eau) à 3 (ciment) t/m^3 . Les dimensions des grains vont du micron à plusieurs centimètres. La pâte de ciment est la matrice qui amalgame les inclusions que sont les granulats.

Un béton contient :

- eau : 14 à 22 % en volume ou 5 à 9 % en masse,
- ciment : 7 à 14 % en volume ou 9 à 18 % en masse,
- granulats : 60 à 78 % en volume ou 63 à 85 % en masse.

La composition d'un béton, pour une structure déterminée, tient compte des résistances mécaniques recherchées, de l'agressivité de l'environnement, des formes architecturales.

2.2. Durabilité du béton

Une structure en béton est généralement exposée à l'action simultanée de facteurs externes qui affectent sa durabilité. Les dégradations peuvent être d'ordre mécanique (surcharges, chocs, abrasion, fatigue), physique (cycles gel-dégel, incendies), chimique et biologique.

Les signes extérieurs de détérioration, dans les quatre cas cités, apparaissent sous forme de fissuration, érosion, cavitation, écaillage, expansion, éclatement. Ils sont observés sur des ponts, des quais, des centrales hydroélectriques, des sols de parking, des murs de soutènement, des traverses de chemin de fer, des barrages, des canalisations d'égout...

Les environnements agressifs vis-à-vis du béton peuvent être liquides (eau de mer), solides (sols gypseux), gazeux (air pollué). Une nomenclature des substances agressives a été établie par la commission RCA (Resistance of Concrete to Chemical Attack). Elle comprend :

- eau douce,
- acides minéraux et organiques,
- bases minérales et organiques,
- sels minéraux et organiques,
- huiles végétales et animales,
- bactéries, algues, micro-organismes.

Les processus de corrosion chimique du béton impliquent des transports de fluide, des réactions aux interfaces solide/fluide, des pressions capillaires, des croissances cristallines, des croissances de gel...

Le tableau 1 donne les processus de détérioration par attaque chimique.

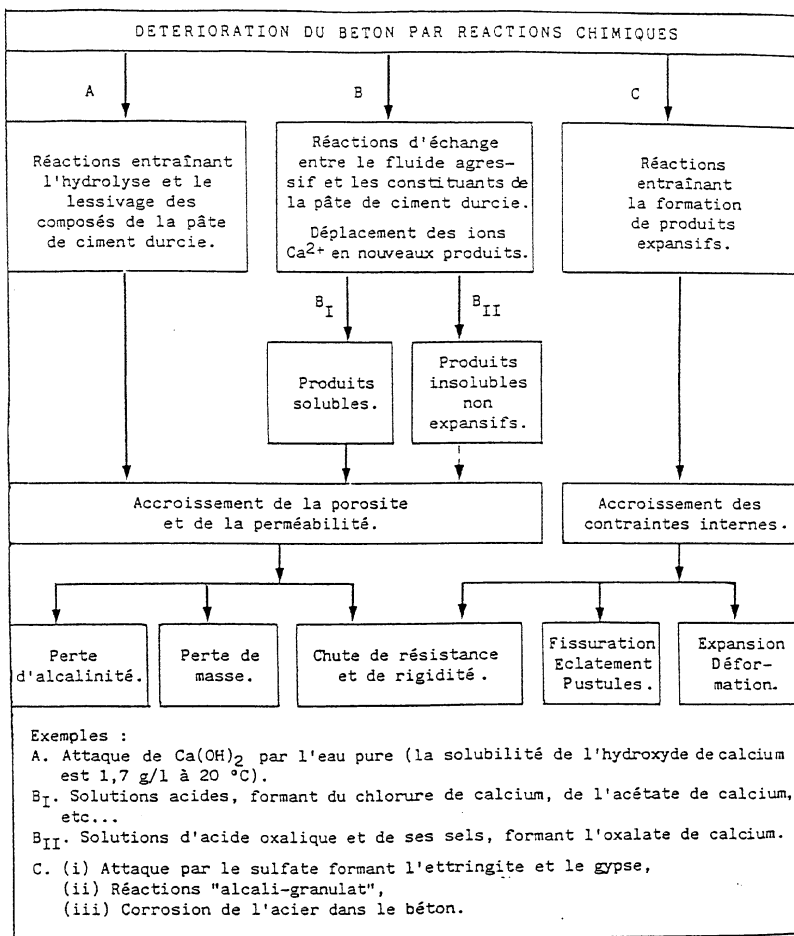


Tableau 1 : Processus de détérioration du béton par voie chimique (Commission RCA).

2.2.1. Attaque des bétons par l'eau de mer

Les sels dissous dans l'eau de mer sont des chlorures (NaCl , MgCl_2 , CaCl_2), des sulfates (MgSO_4 , CaSO_4) et du carbonate (KHCO_3).

Les dégradations sont variables suivant que le béton est totalement immergé, en immersion alternée ou en semi-immersion :

- en immersion totale, l'attaque est essentiellement chimique. C'est celle de CO_2 , des sulfates et des chlorures (tableau 2),
- en immersion alternée ou en semi-immersion, l'attaque est à la fois chimique et physique. L'action mécanique des vagues, du sable et des graviers, de la glace dans les pays nordiques, l'alternance au cours des marées d'expansions ou de retraites dus à l'absorption ou à l'évaporation de l'eau, les conditions atmosphériques (gel, ensoleillement, vent), la corrosion électrochimique des armatures en acier, sont autant de facteurs qui s'ajoutent aux gonflements, fissurations et éclatements d'origine chimique (figure 5).

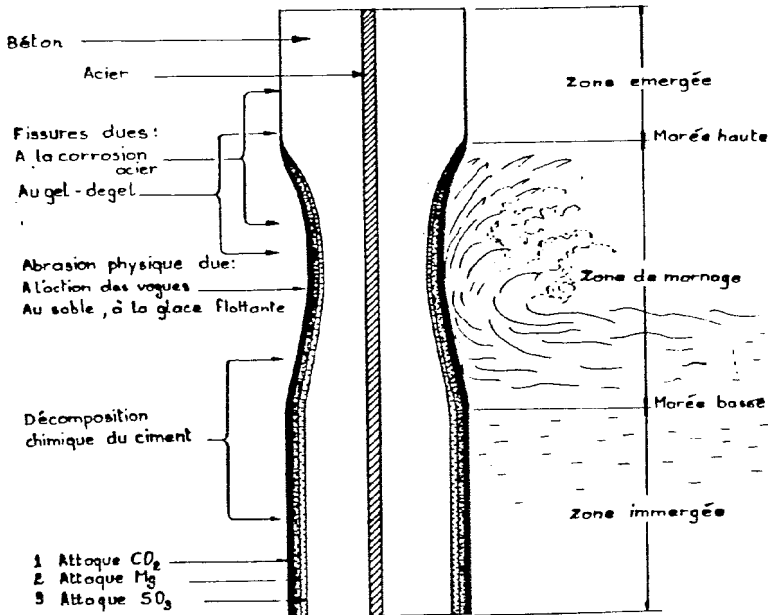
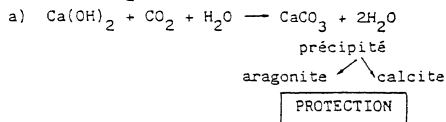
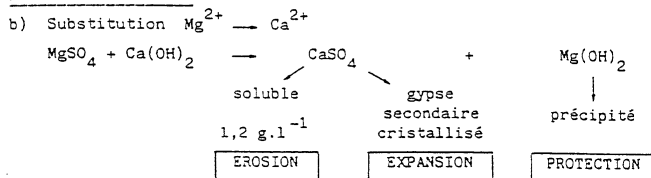


Figure 5 : Attaque par l'eau de mer d'une pile en béton armé perméable (d'après Mehta).

1. - Action de CO_2 2. - Action des sulfates

c) Action du gypse secondaire

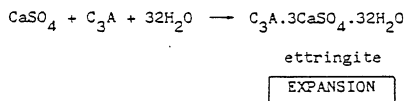
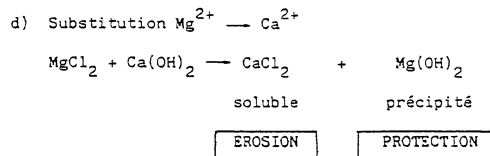
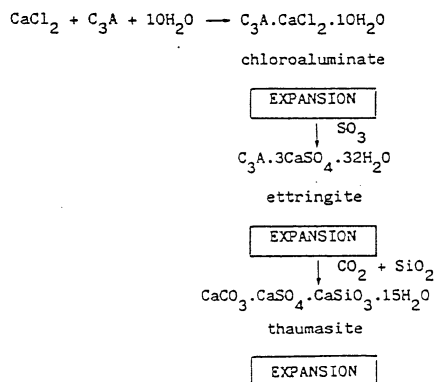
3. - Action des chlorurese) Action de CaCl_2 

Tableau 2 : Détérioration du béton par l'eau de mer.

Les nouveaux composés (tableau 2) sont les carbonates de calcium, aragonite et calcite, le monochloroaluminate de calcium (figure 6), l'ettringite secondaire (figure 7) et la thaumasite (figure 8).

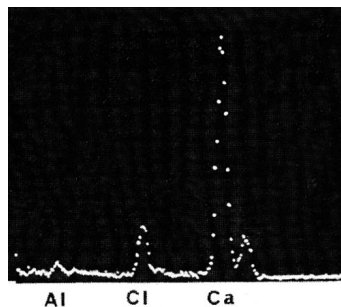
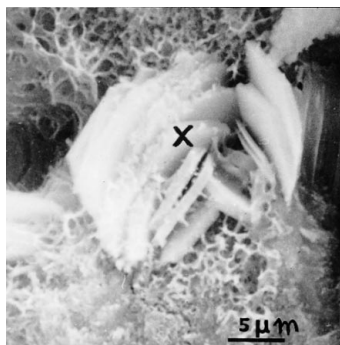


Figure 6 : Cristaux de monochloroaluminate de calcium (X) après six mois dans l'eau de mer. Le spectre X en dispersion d'énergie de ces cristaux est bien composé de Al, Cl et Ca.

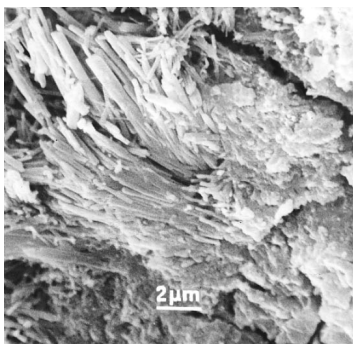


Figure 7 : Ettringite secondaire expansive à comparer aux fines fibres de l'ettringite primaire de la figure 3.

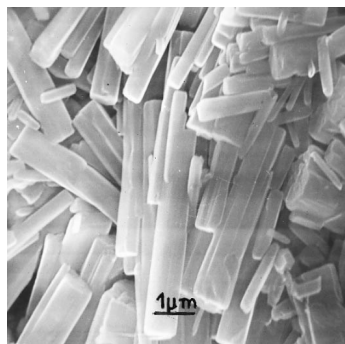


Figure 8 : Thaumasite, isomorphe de l'ettringite mais contenant du carbonate et du silicate de calcium.

Les résultats du tableau 2 ont été obtenus grâce à des essais accélérés en laboratoire, sur des éprouvettes de petites dimensions. Ils sont confirmés par des essais de longue durée comme ceux du Laboratoire Maritime des Ponts et Chaussées de La Rochelle. Des cubes de mortier depuis 1904 et des prismes de béton depuis 1975 sont visibles au pied de la Tour Saint-Nicolas.

Les deux minéraux du ciment essentiellement attaqués par l'eau de mer sont la portlandite et l'aluminate tricalcique ou ses hydrates. La normalisation des ciments a donc limité le pourcentage de l'aluminate tricalcique dans les ciments Portland à 10 %. Ces ciments appelés prise mer, sont agréés après des essais réalisés par le Laboratoire de la Ville de Paris. D'autres ciments comme les ciments de haut fourneau contenant plus de 65 % de laitier, moins calciques que les ciments Portland, sont recommandés en milieu marin. Ils ont été beaucoup utilisés dans les structures le long de nos côtes.

2.2.2. La réaction alcali-granulat

La réaction alcali-granulat est une réaction endogène, complexe et hétérogène. Elle se produit entre les ions de la solution interstitielle et des particules solides distribuées irrégulièrement dans le matériau. Deux cas sont actuellement considérés. Ce sont la réaction alcali-silice, la plus fréquente et la réaction alcali-carbonate ou dédolomitisation.

Les désordres apparaissent à des échéances variables, deux à dix ans, parfois plus. Ils se manifestent par un faïençage de fissures, des exsudations de calcite et de gel de silicate alcalin, des cratères, des colorations ou décolorations, des mouvements de structures (soulèvement de la crête de barrages, flèche des tabliers de pont). Ces désordres peuvent conduire à la destruction des ouvrages. Les réparations, coûteuses, sont le plus souvent inefficaces.

Les réactions chimiques de la réaction alcali-silice ont été établies à partir d'un modèle simplifié utilisant une silice mal cristallisée placée dans une solution de soude par Dent-Glasser. Elles se déroulent en deux séquences :

a - réaction acide-base entre les groupes silanols Si-OH de la silice et les ions hydroxile OH^- de la solution et formation d'un gel de silicate alcalin en présence d'ions Na^+ ou K^+ ,

b - rupture des ponts siloxane Si-O-Si de la silice et soit passage en solution de groupes $\text{H}_2\text{SiO}_4^{2-}$ entraînant la destruction de la structure de la silice, soit formation d'un gel de silicate alcalin en présence d'ions Na^+ ou K^+ .

En présence de granulats siliceux réactifs, la formation d'un silicate alcalin réduit la concentration en Na^+ , K^+ , OH^- de la solution interstitielle mais l'électroneutralité (Na^+ , K^+) OH^- est maintenue. A titre d'exemple 8 % en masse d'opale, silice réactive, remplaçant un sable inerte, conduisent à une réduction d'alcalinité de la solution de 0,80 à 0,35 mole de OH^- par litre.

La réaction alcali-silice produit des gels et des cristaux, observés dans toutes les structures en béton dégradées, autour des granulats siliceux, dans les fissures et plans de clivage des granulats, à la surface du béton sous forme d'exsudats :

- les gels, amorphes et massifs (figure 9) sont des silicates de composition moyenne : 56-86 % SiO_2 , 20-27 % Al_2O_3 , 8-11 % K_2O , 6-8 % CaO ,
- les cristaux se présentent en roses, lamelles, fibres, filaments ou aiguilles. Ce sont les cristaux en forme de rose qui ont la composition la plus stable : 56-63 % SiO_2 , 20-27 % Al_2O_3 , 8-11 % K_2O , 6-8 % CaO ,
- les produits secondaires sont les carbonates et hydroxycarbonates. L'ettringite secondaire est souvent trouvée à l'interface matrice-granat.

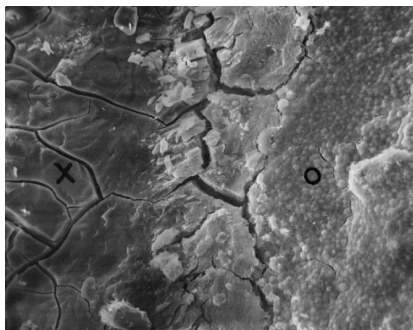


Figure 9 : Gel de silicate alcalin (x) en bordure d'un granulat. Matrice ciment (o).

Le calcium est détecté dans tous les produits de la réaction. Or, la solution interstitielle extraite de bétons sains ne contient que des traces de calcium. Le gel de silicate de potassium qui se forme lors de la réaction alcali-silice est de pH compris entre 11,3 et 12,1. Ce pH, inférieur à celui du béton (13,6) entraîne la dissolution de la portlandite. Les ions Ca^{2+} diffusent vers le site siliceux réactif. Cette hypothèse est confirmée par l'absence de cristaux de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ orientés sur les grains de sable ou les gravillons réactifs.

Afin de reproduire en laboratoire et à court terme les réactions alcali-granat qui peuvent se manifester de nombreuses années après la construction, souvent dans un milieu humide, des essais accélérés ont été mis au point et sont normalisés. Sans détailler les procédures, ces essais accélèrent les réactions par une élévation de température (38°C, 60°C), une concentration élevée en alcalins dans la solution interstitielle soit par ajout d'une solution de soude soit par un fort dosage en ciment

riche en alcalin, à savoir 1,25 % Na_2O . L'autoclavage est aussi utilisé. Les mesures concernent les expansions linéaires d'éprouvettes de béton.

La détérioration des structures en béton par la réaction alcali-granulat (que certains appellent alcali-réaction) est due à l'influence simultanée de plusieurs facteurs :

- la concentration en alcalins de la solution interstitielle : les alcalins solubilisés proviennent essentiellement du ciment mais aussi des feldspaths des granulats et des adjuvants,
- la nature et la quantité des minéraux instables dans les granulats : inclusions d'opale, de calcédoine, de quartz altérés,
- l'humidité de l'environnement : les cycles humidification-dessiccation, le ruissellement des eaux de pluie,
- la température.

Des commissions françaises et internationales ont élaboré des spécifications. Si l'analyse pétrographique des granulats, les mesures d'expansion de prismes de mortier ou de béton, en milieu fortement alcalin, révèlent un risque de réaction, le choix du ciment peut se porter sur un ciment Portland à teneur en $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ inférieure à 0,6 % (en masse), ou sur un ciment composé contenant laitier, cendre volante, pouzzolane, fumée de silice dont l'efficacité devra être testée au préalable.

Des essais sur granulats, mortiers et bétons ont été réalisés avant la construction du Tunnel sous la Manche.

2.2.3. L'incendie

Une structure en béton, exposée au feu, se dégrade par éclatement. Le coefficient de dilatation du béton à partir de la température ambiante est pratiquement égal à $10 \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$, voisin de celui de l'acier des armatures. Le coefficient de dilatation des granulats est variable suivant leur nature minéralogique. La matrice ciment se rétracte lors de la déshydratation. Les constituants du béton subissant des variations dimensionnelles différentes altèrent la cohésion du matériau. Aux dilatations différentielles des solides s'ajoutent les surtensions créées par la formation et la migration de la vapeur d'eau.

Dans une dalle de béton, dont une face est exposée au feu depuis une heure, selon le programme température-temps normalisé, les températures sont de :

- 600°C à 1 cm de la face chauffée,
- 440°C à 2 cm,

- 330°C à 3 cm,
- 170°C à 4 cm.

Dans les mêmes conditions, un poteau en acier s'effondre en dix minutes, sa température atteignant 650°C (exemple des collèges Pailleron). Le béton est utilisé comme coupe-feu.

Sur des prismes de béton maintenus vingt heures en régime isotherme à 150°C, 160°C, 300°C, 390°C, 550°C et 1085°C, les modules d'élasticité mesurés à la sortie du four, accusent une décroissance de 50 % à 300°C et 90 % à 550°C. Les résistances en compression se maintiennent jusqu'à 300°C à 52 MPa mais sont de 19 MPa à 650°C. L'examen au microscope électronique à balayage des surfaces de fracture de ces prismes révèle la transformation des C-S-H à partir de 390°C, de Ca(OH)_2 à 550°C. A 1085°C, le composé calcique est CaO .

2.2.4. Cycles de gel-dégel et sels de déverglaçage

D'après la théorie des pressions osmotiques de Powers et Helmuth, quand la température diminue, la glace se forme d'abord dans les gros capillaires, la tension superficielle y étant plus faible que dans les petits capillaires. A une température donnée, la transformation de l'eau en glace n'est que partielle car l'eau interstitielle est une solution saline. De plus cette transformation enrichit en sels la solution interstitielle et le point de congélation diminue en conséquence. Il y a donc une différence de concentration entre la solution des petits pores qui n'a pas gelé et la solution enrichie en sels des pores de plus grandes tailles. Cette différence de concentration engendre une pression osmotique liée au déplacement de la solution moins concentrée vers la solution plus concentrée. Si le béton est saturé en eau, cette eau excédentaire entraîne une dilatation des pores capillaires et une formation de glace due à un apport de solution moins concentrée. La fissuration se produira quand les pressions osmotiques seront supérieures à la résistance en traction du béton. Cette théorie met en évidence le rôle de la porosité capillaire et la nécessité de créer un réseau de bulles d'air servant de vases d'expansion lors de la formation de la glace.

Les bulles d'air sont créées par addition d'un adjuvant entraîneur d'air (3 à 5 % en volume). Cependant, le volume d'air entraîné dans un béton n'est pas une caractéristique suffisante de bonne résistance au gel. D'où une caractérisation préalable du réseau de bulles par la mesure du facteur d'espacement qui s'effectue sous le microscope optique, par la méthode des traverses linéaires (normes ASTM C 457) en considérant que L est la demi-distance moyenne entre deux parois de bulles. Pour une vitesse de refroidissement donnée et pour un béton donné, il existe une valeur de $\bar{L}$

au-delà de laquelle le béton ne résiste pas au gel. Cette valeur critique $\bar{L}_{\text{crit}}$ correspond à une augmentation brusque de l'expansion linéaire après trois cents cycles de gel-dégel (figure 10).

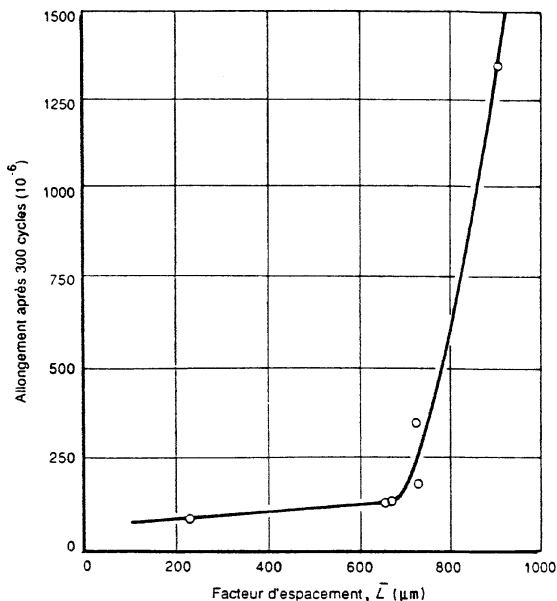


Figure 10 : $\bar{L}_{\text{crit}} = 680 \mu\text{m}$, dans un béton (eau/ciment = 0,5, $2^\circ\text{C}/\text{H}$, gel/dégel dans l'air), d'après Pigeon.

Les sels de déverglaçage répandus sur les réseaux routiers sont des chlorures de sodium et de calcium. Sur autoroute, les quantités peuvent atteindre $13 \text{ kg}/\text{m}^2$ par temps très froid. Les sels, composés hygroscopiques, diffusent dans le béton même si celui-ci n'est pas fissuré. La pénétration peut atteindre 6 à 7 mm. Les solutions à forte concentration en sels de déverglaçage ont une pression de vapeur inférieure à celle des liquides purs. Des hygrométries élevées aggravent donc l'action des sels de déverglaçage. Des pressions hydrauliques sont générées sous la surface où la formation de glace est empêchée par la forte concentration en sel. Elles seraient responsables du phénomène d'écaillage.

3. LES NOUVEAUX MATÉRIAUX

Le béton durci présente des caractéristiques mécaniques inférieures à celles de l'acier ou de l'alumine frittée. Les différences les plus importantes qui apparaissent dans les résistances en compression, en flexion et dans la ténacité, ont été attribuées à la porosité capillaire et à l'excès d'eau nécessaire à la maniabilité du béton frais. Une nette amélioration a été apportée par divers procédés réduisant la porosité soit directement par imprégnation ou serrage, soit indirectement par utilisation d'adjuvants fluidifiants. Des produits nouveaux sont ainsi apparus. Ce sont le ciment M.D.F. (Macro Defect Free) et les bétons D.S.P. (Densified System containing homogeneously arranged ultrafine Particules), B.H.P. (Béton à Hautes Performances), B.T.H.P. (Béton à Très Hautes Performances), B.P.R. (Béton de Poudres Réactives).

3.1. Le ciment M.D.F.

Le ciment M.D.F. se compose en masse, de quatre-vingt-cinq parts de ciment, six parts d'un polymère soluble dans l'eau et neuf parts d'eau. Le polymère s'adsorbe à la surface des grains de ciment, disperse et lubrifie les particules solides qui, par glissement, s'organisent en un empilement compact. Le polymère reste fortement lié aux grains de ciment, s'intégrant aux hydrates inorganiques dans le matériau durci. La microstructure des ciments M.D.F. est différente de celle des ciments Portland. Les silicates hydratés sont d'apparence amorphe et homogène dans la matrice. Les cristaux de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sont en fines lamelles disséminées dans les C-S-H. L'espace trop limité pour la croissance cristalline évite la formation de fissures souvent observées le long des plans de clivage de la portlandite. Des résistances en flexion de 150 MPa (7 MPa dans un béton de ciment Portland) ont été reliées à l'absence de porosité capillaire (1 % en volume) et de fissures. Les M.D.F. peuvent être moulés, extrudés, laminés comme des matières plastiques.

3.2. Les bétons B.H.P., B.T.H.P., B.P.R.

Les nouveaux bétons à hautes performances mécaniques sont obtenus par optimisation :

- *du spectre granulaire* : utilisation de fumée de silice (microsphères de $0,5\ \mu\text{m}$ de diamètre), à raison de 10 à 20 % de la masse du ciment dans les B.H.P. et B.T.H.P., 25 % dans les B.P.R. ;
- *de la dispersion des particules solides dans l'eau de gâchage* : addition d'adjuvant organique fluidifiant (lignosulfonate, mélamine sulfonée, naphthalènesulfonate, polyacrylate), à raison de 1 à 2 % de la masse du ciment. Le rapport eau/ciment peut ainsi passer de 0,5 à 0,2 ;

– *de la maîtrise de la cristallisation des hydrates par un traitement thermique* : formation de tobermorite $C_5S_6H_6$ orthorhombique dans les B.P.R. contenant du ciment Portland (1), de la fumée de silice (0,25), du sable broyé à 250 μm (1,1), du quartz broyé à 10 μm (0,4), de rapport eau/(ciment + fumée de silice) = 0,12, grâce à un fluidifiant (1,8 % d'extrait sec), mélange traité à 200°C, sous pression de 625 atm.

Les résistances en compression, à vingt-huit jours, passent de 40 MPa dans les bétons ordinaires à 80 MPa dans les B.H.P. et 100 MPa dans les B.T.H.P. L'amélioration de ces propriétés mécaniques peut être reliée à la microstructure du matériau. Les bétons de hautes performances présentent une matrice homogène, de faible cristallinité. Les interfaces matrice-granat, zones de faible cohésion, et la cristallisation orientée des cristaux de $Ca(OH)_2$, source de fissuration, caractéristiques des bétons ordinaires ont disparu. Les surfaces de fracture des échantillons, intergranulaires dans les bétons ordinaires, sont transgranulaires dans les B.H.P. et B.T.H.P. La faible porosité capillaire entraîne une bonne résistance aux agressions chimiques ou à l'action du gel-dégel. Ces matériaux nouveaux ont été utilisés dans la construction de ponts de conception nouvelle tels le viaduc de Sylans et le pont de Normandie, de bâtiments de grande hauteur comme la Grande Arche de la Défense et le minaret de la Mosquée Hassan II à Casablanca, d'ouvrages durables dont le Tunnel sous la Manche et la centrale nucléaire de Civeaux.

Les B.P.R. résultant d'une optimisation de la composition cristalochimique, de la répartition granulaire, du traitement thermique correspondent à un réseau continu de particules denses de faible porosité capillaire. Celle-ci est nulle dans les B.P.R. comprimés et traités thermiquement à 200°C. Les B.P.R. 800 pressés à 50 MPa avant prise et traités entre 250 et 400°C, atteignent une résistance en compression de 800 MPa avec des granulats métalliques et une énergie de fracturation de 20 000 J/m². Ils présentent une bonne résistance à l'impact de projectiles. Ils peuvent aussi se substituer à l'acier. Les B.P.R. 200, non pressés, sont voisins des B.T.H.P. Cependant, leur grande ductilité permet la suppression d'armatures en acier et l'allègement des structures. Des structures en béton précontraint, sans armatures traditionnelles, sont réalisables sur chantier.

4. CONCLUSION

Ciments et bétons sont des matériaux complexes et évolutifs en fonction du temps. Ils sont aussi poreux et peuvent se transformer dans les milieux agressifs, chimiques ou physiques. L'apparition de nouveaux constituants peut entraîner une perte des performances du matériau dans les constructions.

Diminuer la porosité capillaire par l'emploi d'adjuvants organiques fluidifiants, réduisant la quantité d'eau à utiliser, optimiser le spectre granulaire à l'aide de particules fines comme la fumée de silice, traiter thermiquement des mélanges ciment + quartz broyé sont autant de procédés utilisés dans l'élaboration de nouveaux matériaux à hautes performances, les B.H.P., B.T.H.P. et B.P.R.

Le béton était souvent considéré par les mécaniciens comme un réseau diphasique constitué d'une matrice homogène, plus faible que le squelette rigide formé par les granulats. Cette position a évolué grâce à la collaboration récente entre les spécialistes de la science des matériaux, de la mécanique, de l'ingénierie. Des modèles mathématiques de comportement à long terme du béton, prenant en compte les données physico-chimiques du matériau sont en cours.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] «*Le béton hydraulique - Connaissance et pratique*» - Sous la direction de J. BARON et R. SAUTEREY, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 1982, 560 pages, 31 chapitres.
- [2] «*Les Bétons à Hautes Performances - Caractérisation, durabilité, applications*» - Sous la direction de Y. MALIER, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, 1992, 672 pages, 39 chapitres.
- [3] «*Les Bétons de Poudres Réactives à Ultra Haute Résistance*» - Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, 1995, 143 pages, 6 chapitres.
- [4] J.-L. VIGNES, M. MORANVILLE et J.-P. BOURNAZEL : «*Une vie de ciment*», B.U.P. n° 780, Janvier 1996.