

La prise du ciment

Jacques Baron* directeur général adjoint de l'Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques (ATILH)

Vingt ans de progrès par réduction de la porosité des bétons

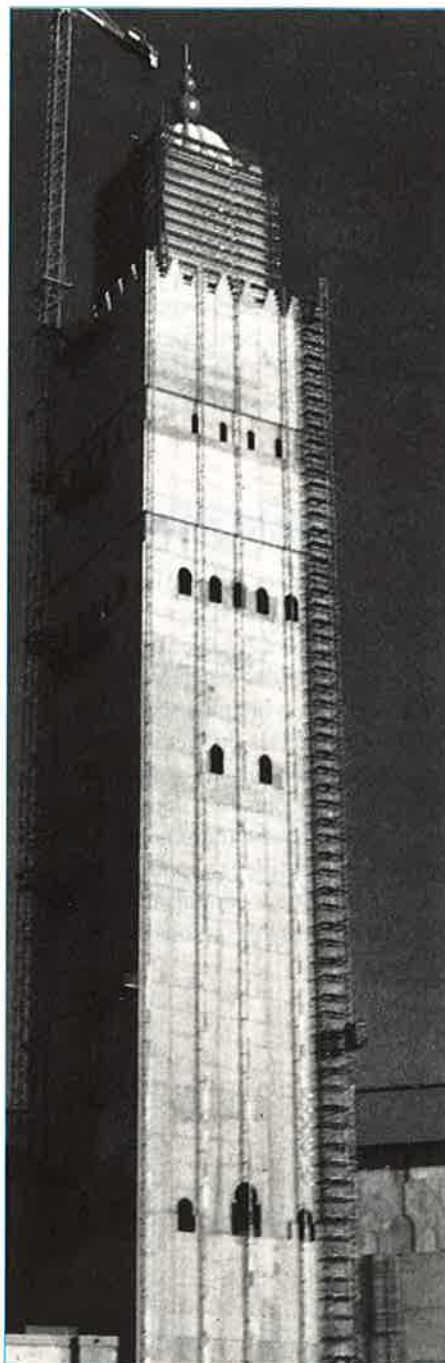
En vingt ans, la résistance du béton à la compression a été multipliée par trois et sa perméabilité divisée par 50. Ce bond a été accompli principalement en réduisant la porosité capillaire qui est passée de 10 % à pratiquement 0 %. Ces progrès résultent de la mise sur le marché, par l'industrie chimique, de molécules organiques servant aux superplastifiants capables de défloculer les grains, et du développement de l'industrie du ferro-silicium avec pour sous-produit des fumées de silice, 30 fois plus fines que la poudre de ciment. Ils viennent aussi du progrès de la régularité et de la réactivité des ciments. Ils tiennent, enfin, aux connaissances actuelles sur la façon de minimiser la porosité des poudres [1]. L'emploi conjoint de superplastifiant et de fumées de silice a permis de réduire cette porosité de 20 % et le dosage en eau des bétons dans la même proportion. En outre, la défloculation des grains changeant le comportement du béton frais, il a été possible de concilier réduction du dosage en eau et consistance fluide facilitant la mise en œuvre du béton.

Il faut agir sur les hydrates eux-mêmes et la façon dont ils s'assemblent

Au-delà de la réduction de la porosité, il fallait jouer sur la texture fine du ciment durci, en optimisant les propriétés au niveau des hydrates : c'est ce qu'ont fait les inventeurs du béton de poudres réactives [2]. Mais ces travaux ont mis l'accent sur la structure des hydrates et leur morphologie, non sur les forces qui les lient entre eux. Pour avancer encore, ce sont ces liaisons qu'il faut comprendre, aux fins de les accroître.

On sait, depuis la thèse de Henri Le Chatelier (1887), que les grains de ciment anhydre se dissolvent et que la réaction entre le ciment et l'eau se fait en solution. Or, la plupart des réactions en solution qui donnent un précipité solide conduisent à une poudre, tandis que le ciment mène à un précipité dont la cohésion est suffisamment élevée pour qu'on puisse construire des immeubles et des ponts ! La question de savoir pourquoi ce précipité est cohérent a été posée au CNRS par l'industrie cimentière (1994 : Contrat de programme PIRMAT-ATILH) [3].

* Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques, 7, place de la Défense, 92974 Paris-la-Défense Cedex. Tél. : 01.55.23.01.34. Fax : 01.49.67.10.46. E-mail : Ciment.Atilh@wanadoo.fr



La Grande Mosquée Hassan II

Ce bâtiment de 175 000 m² édifié à Casablanca, en bordure de l'océan, est en contact direct avec les flots. Le bâtiment Mosquée, de 200 m x 100 m, d'une hauteur de 60 m, couronné par une toiture ouvrante de 2 400 m² (charpente de 800 t), est constitué par une nef de prière pouvant recevoir 25 000 fidèles. Le minaret est une tour de 200 m de hauteur. Les bétons de hautes performances ont fait l'objet d'études spécifiques pour résister (100 MPa) aux contraintes dues aux efforts sismiques, ainsi qu'à celles de la houle et aux effets de corrosion sur les armatures en milieu marin.

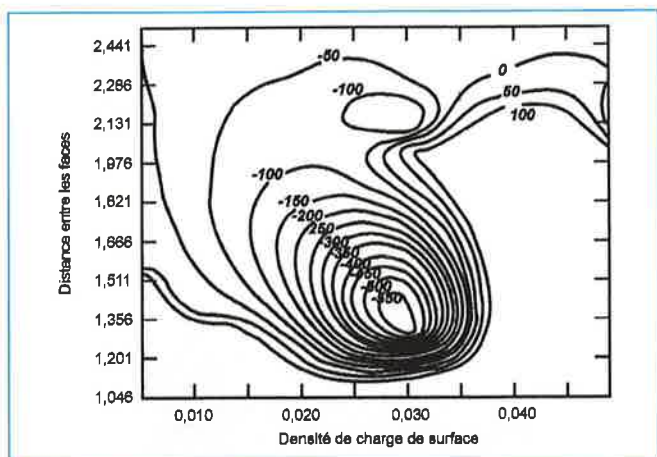


Schéma 1 - Courbes d'iso-pression entre deux faces portant des ions calcium plongées dans l'eau, fonction de la distance entre faces et de la densité de charge de surface (d'après [5]).

Comme le dit P. Boch, dans l'article précédent, ce sont les C-S-H ($C = CaO$, $S = SiO_2$, $H = H_2O$) qui assurent la liaison du ciment. La contribution des C-S-H aux résistances mécaniques est due aux forces physiques interhydrates, forces qui doivent donc être attractives. On sait que les particules minérales ont, en général, des surfaces électriquement chargées, qui attirent un nuage de « contre-ions » de signes opposés. Ce schéma conduirait à la conclusion, souvent mise en défaut, que deux particules identiques, chargées de même façon, doivent toujours se repousser mais, s'il en était ainsi, le plâtre, dont les hydrates sont des cristaux de gypse tous semblables, ne ferait pas prise. Or pour raisonner sur les forces qui s'exercent entre des particules en suspension, il faut, en sus des charges électriques, considérer les mouvements des contre-ions à l'intérieur du nuage. Si ce mouvement est complètement désordonné, alors les particules semblables se repoussent (théorie DLVO) ; si, au contraire, les mouvements des contre-ions s'ordonnent du fait des interac-

tions entre contre-ions, ou entre contre-ions et ions en surface des particules, ou encore entre contre-ions et molécules d'eau, il peut apparaître des effets d'attraction [4]. La modélisation [5] montre l'influence déterminante de la densité d'ions calcium à la surface des C-S-H. L'assemblage des particules de C-S-H s'apparente à un phénomène de croissance cristalline, ici gouverné par les forces d'attraction entre les faces des feuillettes. En schéma 1, la courbe référencée « 0 » correspond à une pression nulle ; les courbes repérées par des valeurs négatives correspondent à une attraction entre faces, donnant une liaison mécaniquement résistante ; celles repérées par des valeurs positives correspondent à une répulsion, donc à une résistance nulle. Ce modèle doit toucher à quelque chose d'essentiel quand on réalise que les liants courants sont tous des sels de calcium (silicates, aluminates, sulfates, et phosphates de calcium).

La compréhension des forces qui gouvernent l'assemblage des hydrates et déterminent, à porosité donnée, la résistance mécanique et les autres propriétés des pâtes de ciment, est déterminante pour progresser dans la science des matériaux de construction, ce qui constitue vraiment un enjeu colossal. ■

Références

- [1] Baron J., Ollivier J.P., *Les bétons. Bases et données pour leur formulation*, Éditions Eyrolles, 1996.
- [2] Richard P., Cheyrezy M., Les bétons de poudres réactives (BPR) à ultra haute résistance (200 à 800 MPa), *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics*, 1995, n° 532.
- [3] Contrat de Programme de Recherche PIRMAT-ATILH, *Matériaux granulaires cohésifs ; liants hydrauliques (1994-1997)*.
- [4] Van Damme H., Et si le Chatelier s'était trompé ? Pour une physico-chimio-mécanique des liants hydrauliques et des géomatériaux, *Annales des Ponts et Chaussées*, 1994, n° 71.
- [5] Pellencq R.J., Crespin M., Lequeux N., Ménager C., Costalin L., Delville A., Caillol J.M., Van Damme H., 2nd RILEM Workshop on Hydration and Setting, Dijon (11-13 juin 1997).