

Bétons fluides à hautes performances : relation entre formulation, rhéologie et propriétés mécaniques

Joumana Yammine

Laboratoire de Mécanique et Technologie – Secteur Génie Civil et Environnement -
Ecole Normale Supérieure de Cachan – 61 avenue du président Wilson – 94235 Cachan
Cedex

RESUME. L'objectif de notre étude est de mettre en évidence l'effet des principaux paramètres de formulation permettant d'améliorer les propriétés rhéologiques des bétons à hautes performances (BHP) afin de les rendre autoplaçants (BAP). Pour cela, divers essais de caractérisation rhéologique du béton et de la pâte de ciment qui en est extraite sont réalisés pour répondre au compromis entre fluidité et stabilité du matériau. Nous montrons la forte influence de la fraction volumique granulaire sur la fluidité du béton. Des essais mécaniques et de retrait au jeune âge, sont effectués pour vérifier les performances du béton formulé.

MOTS-CLÉS : propriétés rhéologiques, bétons autoplaçants à hautes performances, propriétés mécaniques.

ABSTRACT. The present study tends to conciliate the high mechanical performance of the high performance concrete (HPC) with the good workability of the self-compacting concrete (SCC). A correlation between the rheological behaviour of the concrete and its corresponding cement paste is undertaken to show the influence of the HWRA's dosage and the granular volume fraction. Then, a characterisation of mechanical properties and deformations at early age related to the concrete shrinkage is treated to insure and examine the HP-SCC feasibility and performance in function of the granular proportion.

KEYWORDS: rheological properties, high strength self-compacting concrete, mechanical properties.

1. INTRODUCTION

Les bétons à hautes performances (BHP) sont des bétons qui développent des résistances mécaniques élevées (entre 50 et 80 MPa) du fait de la diminution de la porosité rendue possible grâce à l'ajout de superplastifiants qui diminuent la teneur en eau nécessaire à l'obtention d'une maniabilité suffisante. De plus, le spectre du mélange granulaire utilisé est élargi par l'ajout d'éléments ultrafins qui confèrent à l'ensemble une haute compacité (Bache, 1987). De ce fait, ces bétons présentent une durabilité accrue (Malier, 1991) grâce à une perméabilité réduite aux agents agressifs chimiques extérieurs.

Les bétons autoplaçants (BAP) sont reconnus pour leur très grande déformabilité et leur facilité de mise en oeuvre sous l'effet de leur poids propre, sans nécessiter de vibration, même en présence de ferraillements très denses (AFGC, 2000). Il peut être intéressant de rappeler que les bétons, de manière générale, sont des fluides à seuil : ils ne s'écoulent que si la contrainte qui leur est appliquée est supérieure à leur seuil d'écoulement. Dans ce cadre, selon Wallevik (2003), un BAP correspond à un

béton dont le seuil d'écoulement est inférieur à 200 Pa. D'un point de vue essai empirique, ceci correspond à un étalement de 600 mm.

La plupart des ouvrages d'art dans lesquels sont utilisés des BHP, présentent souvent des ferraillements très denses (supérieurs à 200 kg/m³) associés à la présence de gaines de précontrainte. L'ensemble constitue un réseau d'obstacles à la mise en oeuvre du béton (Figure 1). Le travail présenté ici vise donc à améliorer les propriétés rhéologiques des BHP de façon à les rapprocher des BAP sans affecter de façon majeure leurs performances mécaniques et leur durabilité. Le problème est plus simple qu'il n'y paraît de prime abord puisque les pâtes de ciment contenues dans les BHP répondent déjà en partie à la problématique d'une forte maniabilité associée à des performances mécaniques élevées. Les ciments utilisés présentent en effet généralement des résistances mécaniques élevées et sont fortement superplastifiés. Pour acquérir une véritable rhéologie de BAP, il semble que le volume du squelette granulaire présent dans le mélange ait un rôle non négligeable à jouer. C'est sur ce point que va se focaliser notre étude.

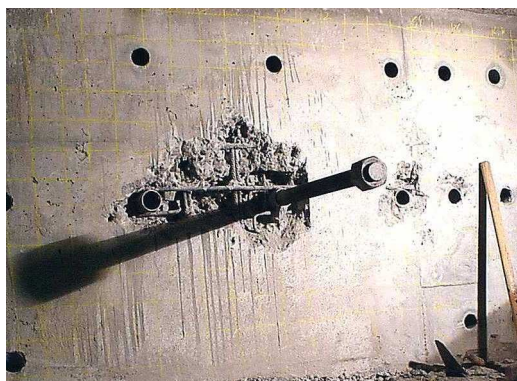


Figure 1 : Défaut de mise en oeuvre dans un ouvrage d'art précontraint fortement ferrailé.

(Source : P. Dantec LRPC Clermont-Ferrand).

2. MATERIAUX ET FORMULATIONS

Pour illustrer notre travail, nous allons étudier les effets d'une modification de formulation d'un béton sur sa rhéologie et ses performances mécaniques à partir d'un béton célèbre : le BHP du viaduc de Millau.

En kg/m ³	CEM I 52,5	Eau	Optima 175®	Sable 0/2R	Sable 0/4C	Gravillon 4/6C	Gravillon 6/14C	E/C	G/S	Φ _{G+S}
Masse volumique	3150	1000	1055	2640	2680	2697	2697	-	-	-
Pâte de ciment	3,15	1,05	0,044	0	0	0	0	0,33	0	0%
Béton	420	140,9	5,88	312	468	362	711	0,33	1,37	69%

Tableau 1 : Formulation des pâtes de ciment et des bétons gâchés.

Ce béton est composé du ciment CEM I 52,5 PM ES, d'un superplastifiant, de trois granulats naturels calcaires concassés des carrières de Rascalat de classes 0/4, 4/6 et 6/14 et d'un sable silico-calcaire 0/2 roulé des carrières d'Usanges. Le superplastifiant Optima 175® est un mélange de polycarboxylates et de diphosphonates modifiés (Chrysofluid). La formulation du BHP de Millau, qui

sera notre référence dans ce travail, fait intervenir une teneur de 1,4% de superplastifiant par rapport à la masse du ciment. Le Tableau 1 regroupe la formulation de ce béton et de la pâte de ciment qui en est issue.

Nous allons dans la suite de ce travail faire évoluer la formulation de nos bétons autour de la formulation de référence en gardant les paramètres suivants constants :

- dans le souci de conserver les résistances mécaniques du BHP dont le squelette avait été initialement optimisé, le rapport Gravillons sur Sables (G/S) sera maintenu à la valeur de 1,37.
- le rapport Eau sur Ciment (E/C) permettant d'atteindre les résistances de ce béton sera aussi conservé.

Il semble d'une manière générale que le seuil d'écoulement des bétons de type autoplaçants diminue (*i.e.* leur fluidité augmente) lorsque le volume de pâte augmente (Toutou et Roussel, 2006) et lorsque le dosage en superplastifiant augmente. De façon à mettre en évidence les paramètres influençant la rhéologie, les essais de caractérisations rhéologiques effectués dans ce travail traitent d'une part de l'impact de la diminution de la fraction volumique granulaire ϕ_{G+S} , et d'autre part de l'effet de la variation du dosage en superplastifiant. Des mesures de résistances mécaniques ainsi que des mesures de retrait sont réalisées en parallèle pour vérifier les performances mécaniques des bétons obtenus.

3. PROGRAMME EXPERIMENTAL

3.1. MESURE DU SEUIL DE LA PATE DE CIMENT

La mesure du seuil d'écoulement des pâtes de ciment est effectuée par des essais d'étalement. La procédure consiste à verser lentement, sur une plaque de verre, et à une faible hauteur, environ 600 dm³ de pâte contenue dans un bûcher (Figure 2). Le diamètre final de la galette étalée est relié au seuil d'écoulement τ_0 de l'échantillon à partir d'un calcul analytique (Roussel et Coussot, 2005) :

$$\tau_0 = \frac{225\rho g V^2}{128\pi^2 R^5} \quad [\text{Eq. 1}]$$

Avec ρ la masse volumique, V le volume versé et R le rayon d'étalement.

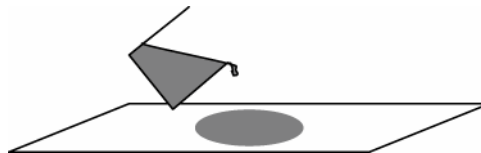


Figure 2 : Méthode de mesure du seuil par l'étalement au bûcher.

3.2. ESSAIS DE CARACTERISATION SUR BETON

La maniabilité des bétons les plus fermes de cette étude est caractérisée de manière traditionnelle par l'affaissement au cône d'Abrams. Pour ces consistances de béton (affaissement S inférieur à 20 cm), le résultat de l'essai est corrélé au seuil du matériau τ_0 (Roussel, 2006 a) :

$$S = 25,5 - 17,6 \frac{\tau_0}{\rho} \quad [\text{Eq. 2}]$$

Pour des bétons plus fluides, l'essai fournit une mesure d'étalement. Ce dernier est alors relié au seuil d'écoulement par la même relation [Eq. 1] que celle utilisée pour les pâtes de ciment. Cependant, dans le cas de l'essai d'étalement sur BAP, l'épaisseur finale de la galette est du même ordre de grandeur que le diamètre maximal du plus gros granulat empêchant ainsi toute corrélation analytique entre seuil et étalement (Roussel et Coussot, 2006).

La boîte LCPC, conçue par Roussel (2007) permet d'établir une telle corrélation à l'aide d'un canal de dimensions 150 x 200 x 1000 mm. Dans ce cas, l'épaisseur du matériau à l'arrêt de l'écoulement est comprise entre 5 et 10 cm et permet de considérer l'écoulement du béton et son arrêt comme ceux d'un fluide homogène.

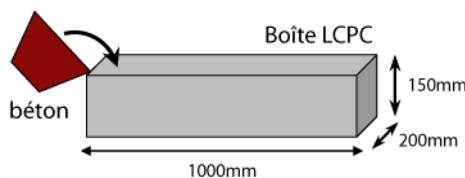


Figure 3 : Dispositif de la boîte LCPC.

Après l'arrêt de l'écoulement, la longueur d'étalement mesurée dans la boîte permet de calculer le seuil du béton à partir des relations fournies dans (Roussel, 2007).

3.3. ESSAIS MECANQUES ET DEFORMATIONS AUX JEUNES AGES

Les essais mécaniques de compression simple sont réalisés à 28 jours. Les résultats présentés sont une moyenne de trois mesures sur trois éprouvettes cylindriques 11 x 22 cm pour chaque type de formulation. Nous utilisons de plus pour caractériser le retrait de nos bétons l'essai à l'anneau (Haouas, 2007). Trois jauges de déformations sont alors collées sur l'anneau en laiton et permettent la mesure de l'évolution des déformations aux jeunes âges du béton coulé autour de l'anneau. Le décoffrage se fait à 24h, marquant le départ du séchage dans une enceinte climatique qui contrôle et impose des conditions précises en température (23 °C) et en humidité relative (50% HR avec ventilation imposée).

4. DE LA RHEOLOGIE DE LA PATE DE CIMENT A CELLE DU BETON

4.1. COMPROMIS ENTRE STABILITE ET FLUIDITE

Pour limiter la ségrégation des plus grosses particules dans un béton, Roussel (2006 b) propose un calcul statique qui considère l'équilibre entre la force gravitationnelle et la force de traînée appliquée sur une sphère dans un fluide à seuil. Il construit alors pour une particule sphérique, de densité ρ_g et de diamètre d , un critère de stabilité fournissant le seuil minimal du fluide porteur τ_0 :

$$\tau_0 \geq \frac{dg|\rho_g - \rho_f|}{18} \quad [\text{Eq. 3}]$$

Dans le cas des granulats utilisés ici, le seuil de la pâte de ciment nécessaire à la stabilisation d'une particule de 14 mm est ainsi de 5 Pa pour une densité de la pâte ρ_f d'environ 2000 kg/m³. Ce critère ne prend pas en compte l'éventuel effet de réseau dû à la présence de granulats de tailles intermédiaires (sable) et se met ainsi en sécurité vis-à-vis de la ségrégation des plus grosses particules.

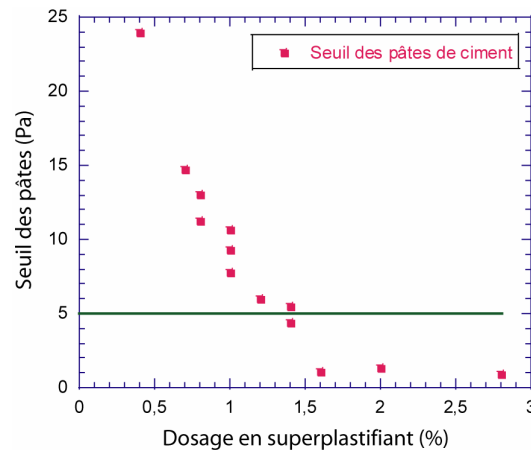


Figure 4 : Seuil des pâtes de ciment en fonction de la teneur en superplastifiant.

En diminuant le dosage en superplastifiant au niveau de la pâte de ciment par rapport à la pâte de référence, les résultats de la Figure 4 montrent une augmentation du seuil. Avec une teneur de 1,4% par rapport à la masse de ciment, le seuil requis pour la stabilité des granulats dans le béton est atteint pour une fluidité maximale. Dans le cas du ciment et du superplastifiant utilisés ici, cette valeur est aussi celle du dosage à saturation. Pour des dosages inférieurs, le béton sera stable mais ne présentera pas la fluidité maximale. Une telle approche ne considère que la stabilité des plus gros grains du mélange. La stabilité de la pâte de ciment elle-même (ressuage) n'est pas un problème dans notre cas pour des teneurs en superplastifiant inférieures ou égales à 2%, ce qui ne constitue donc pas ici un critère de formulation.

4.2. INFLUENCE DE LA FRACTION VOLUMIQUE GRANULAIRE SUR LA RHEOLOGIE DU BETON

Une fois le seuil de la pâte de ciment optimisé vis-à-vis de la ségrégation, l'élaboration d'un béton très fluide nécessite une augmentation du volume de pâte de façon à obtenir un seuil de béton inférieur à 200 Pa (Wallevik, 2003). Nous avons fait varier la fraction volumique granulaire dans le mélange et mesuré le seuil du béton à l'aide du cône d'Abrams et de l'essai à la boîte LCPC.

Les résultats obtenus sont rassemblés sur la Figure 5 et montrent trois régimes :

- pour $\phi_{G+S} > 64 \%$ les seuils d'écoulement sont élevés et les interactions granulaires sont probablement dominées par des contacts de type frictionnel (comme dans un béton traditionnel) ; le seuil d'écoulement est relié à l'affaissement du béton par l'[Eq. 2],
- pour $\phi_{G+S} < 58 \%$ les seuils sont faibles et *a priori* les interactions hydrodynamiques générées par la présence des grains dans le fluide dominant les contacts directs ; le seuil d'écoulement est relié à l'écoulement du béton dans la boîte LCPC d'après (Roussel, 2007),
- pour $58 \% < \phi_{G+S} < 64 \%$, nous sommes dans un régime de transition où effets hydrodynamiques et contacts de type frictionnels se partagent la domination du comportement ; le seuil d'écoulement est relié à l'étalement du matériau au cône par l'[Eq. 1].

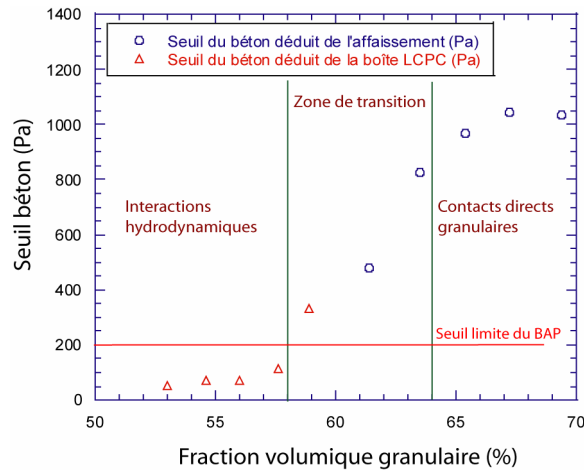


Figure 5 : Seuil du béton en fonction de la fraction volumique granulaire.

Il suffit donc de retirer environ 6 % du volume du squelette granulaire pour faire passer le comportement rhéologique d'un régime dominé par les frictions entre grains (fortement dissipatives) à un régime dominé par le comportement de la pâte de ciment et les interactions hydrodynamiques engendrées par la présence des granulats. Dans la pratique, ceci revient à transformer un béton de consistance traditionnelle en un béton autoplaçant. Toutefois, dans notre cas pour parvenir à ces propriétés rhéologiques, la quantité de ciment exigée est considérable, posant alors le problème du retrait et d'un fort dégagement de chaleur lors de l'hydratation du ciment. La nécessité d'effectuer une substitution du ciment par des composants alternatifs (de types fillers) nous amène alors à suivre le chemin traditionnel de formulation des BAP, ce qui ne sera pas sans conséquences sur les résistances mécaniques développées par le béton.

5. PROPRIETES MECANIQUES DU BETON

Les essais de compression simple effectués à 28 jours sur les bétons gâchés montrent sur la Figure 6 que la diminution de ϕ_{G+S} n'influe pas sur la résistance mécanique du béton (écart type lié aux mesures d'environ 4 Pa). Ceci est surprenant puisque les travaux de de Larrard (2000) ont montré que la résistance mécanique du béton diminuait lorsque la proportion du squelette granulaire dans le béton s'éloignait d'un optimum. Même si cette optimum est ici inconnu (nous pourrions cependant considérer qu'il a été atteint par les ingénieurs qui ont formulé le béton du viaduc et qu'il se situe autour de 69%), nous obtenons tout de même des résistances mécaniques constantes quelle que soit la fraction volumique granulaire sur une plage comprise entre 53% et 69%.

Toutefois, il peut être noté que les résistances mécaniques du BHP de Millau proviennent effectivement, pour une part, de l'optimisation du squelette granulaire qui présente une haute compacité à $G/S = 1,37$, mais d'autre part, de la qualité et des performances de la pâte de ciment du fait d'un faible rapport $E/C = 0,33$ et du ciment qui est un CEM I 52,5. Même s'il est difficile d'imaginer que la résistance mécanique de la pâte est de l'ordre de celle des granulats, l'écart entre les deux est probablement beaucoup plus faible que dans le cas d'un béton ordinaire. Dans ce cadre, une variation des proportions respectives des composants pourrait n'avoir qu'un impact très réduit sur les performances mécaniques.

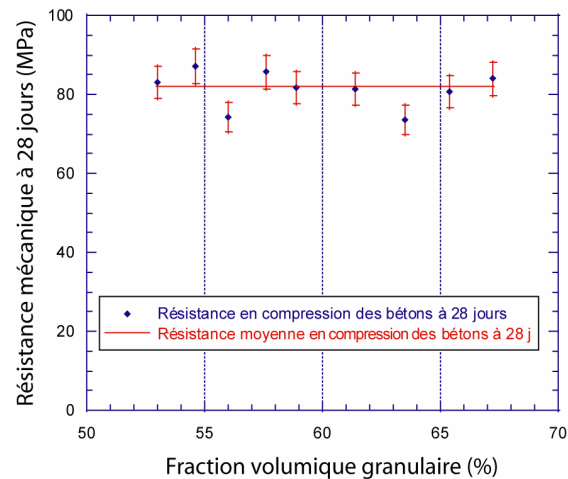


Figure 6 : Mesures de la résistance caractéristique du béton à 28 jours.

6. DEFORMATIONS DIFFERÉES DU BETON

D'un point de vue physico-chimique, plus le volume de pâte augmente, plus le volume d'hydrates formés par mètre cube de béton sera important et plus la chaleur d'hydratation dégagée sera élevée. Le risque de fissuration d'un tel matériau est ainsi fortement accru (Lamour *et al.*, 2004). La Figure 7 montre pour des concentrations granulaires faibles ($\phi_{G+S} = 56\%$), l'endommagement du béton dans les conditions extrêmes de séchage telles que celles imposées lors de nos essais à l'anneau. Pour des concentrations plus élevées, la fissuration n'apparaît pas ($\phi_{G+S} = 62$ et 69%).

D'un point de vue mécanique, une diminution de la proportion granulaire tendrait à diminuer le module élastique du béton (matériau moins « rigide ») et à engendrer plus de déformations différées (Le Roy, 2006). Les résultats de la Figure 7 montrent en effet des déformations plus importantes lorsque le béton est moins concentré en granulats.

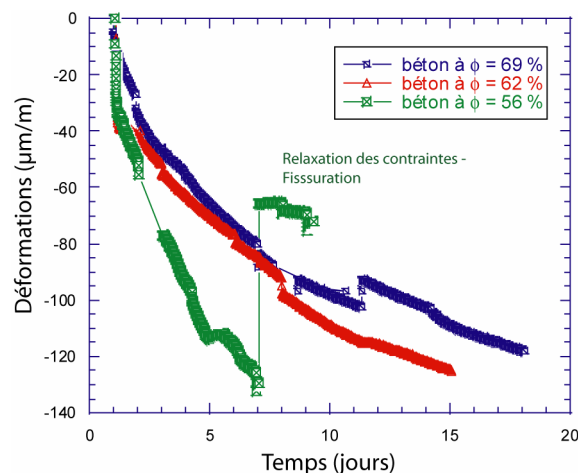


Figure 7 : Déformations des bétons aux jeunes âges en fonction de la fraction volumique granulaire ϕ .

7. CONCLUSIONS

Le béton du viaduc de Millau est un béton de hautes performances mécaniques et de grande durabilité avec, d'une part, un rapport E/C relativement faible ($E/C = 0,33$) et d'autre part, un rapport

G/S optimisé ($G/S = 1,37$). Nous avons montré ici qu'il suffit de lui soustraire une faible proportion de volume de granulats (6 %), les autres paramètres étant conservés constants, pour obtenir un béton dont la rhéologie est celle d'un BAP sans perte de résistances mécaniques. Cependant, la quantité de ciment nécessaire n'est pas acceptable d'un point de vue chaleur d'hydratation dégagée et pourrait engendrer des problèmes de fissuration au jeune âge. La perspective naturelle de ce travail est d'étudier l'effet d'une substitution d'une partie du ciment par des fines. Elles provoqueront probablement une perte de résistance mécanique du béton au jeune âge mais, si elles sont correctement sélectionnées (additions présentant des propriétés pouzzolaniques), cet effet sur le long terme pourrait ne pas être excessivement pénalisant.

8. BIBLIOGRAPHIE

- Bache H. (1987) « Compact reinforced composite, basic principles », Aalborg Portland, CBL Report 41, p. 87.
- De Larrard F. (2000) « *Structures granulaires et formulation des bétons* », Ouvrages d'art OA 34, Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées.
- Haouas A. (2007) « Comportement au jeune âge des matériaux cimentaires. Caractérisation et modélisation chimio-hydro-mécanique du retrait », Thèse de Doctorat, ENS de Cachan.
- Le Roy R. (2006) « *Rhéologie et stabilité des matrices cimentaires et des coulis* », Ouvrages d'art OA 53, Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées.
- Lamour V., Haouas A., Moranville M., Schell R. (2004) « New technique for characterization of early-age cracking of mortars », *ACBM/RILEM Symposium "Advances in Concrete through Science and Engineering"*.
- Malier Y. (1991) « *Bétons à Hautes Performances* », Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Recommandations de l'Association Française du Génie Civil. (2000) « *Les bétons autoplaçants : recommandations provisoires* ».
- Roussel N. (2006 a) « Correlation between yield stress and slump: Comparison between numerical simulations and concrete rheometers results », *RILEM Materials and Structures*, vol. 37, n°4, p. 469-477.
- Roussel N. (2006 b) « A theoretical frame to study stability of fresh concrete », *RILEM Materials and Structures*, vol. 39, n°1, p. 75-83.
- Roussel N. (2007) « The LCPC box: a cheap and simple technique for yield stress measurements of SCC », accepted for publication in *RILEM Materials and Structures*.
- Roussel N., Coussot P. (2005) « "Fifty-cent rheometer" for yield stress measurements: from slump to spreading flow », *Journal of Rheology*, vol. 49, n°3, p. 705-718.
- Roussel N., Coussot P. (2006) « Ecoulements d'affaissement et d'étalement : modélisation, analyse et limites pratiques », *Revue Européenne de Génie Civil*, vol. 10, n°1, p. 25-44.
- Toutou Z., Roussel N. (2006) « Multi scale experimental study of concrete rheology: from water scale to gravel scale », *RILEM Materials and Structures*, vol. 37, n°2, p. 167-176.
- Wallevik O. (2003) « Rheology - a scientific approach to develop self-compacting concrete », *3rd RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*, Chicago.