

De la pâte de ciment au béton: modélisation et mesures expérimentales des propriétés rhéologiques

by

**C.F. Ferraris and N.S. Martys
Building and Fire Research Laboratory
National Institute of Standards and Technology
Gaithersburg, MD 20899 USA**

**Reprinted from Rhéologie - Génie Civil et Environnement. Proceedings. 36^{ème} Colloque
du Groupe Français de Rhéologie, Marne la Vallée, October 10-12, pp. 226-230, 2001.**

**NOTE: This paper is a contribution of the National Institute of Standards and
Technology and is not subject to copyright.**



NIST
National Institute of Standards and Technology
Technology Administration, U.S. Department of Commerce

De la pâte de ciment au béton: modélisation et mesures expérimentales des propriétés rhéologiques

C. F. Ferraris, N. S. Martys

National Institute of Standards and Technology, USA

Résumé : La prédiction des propriétés rhéologiques du béton est essentielle pour la bonne utilisation du matériau. Le béton ne comprenant plus uniquement des granulats, du ciment et de l'eau mais aussi des adjuvants et des additions minérales, il est nécessaire de pouvoir tester une composition envisagée dans un système simple et en laboratoire. La méthode présentée ici permet de mesurer les propriétés de la pâte de ciment, contenant les adjuvants et les additions minérales, et de prédire le comportement du béton. La prédiction est possible à deux niveaux: qualitatif ou quantitatif. Au niveau qualitatif, la valeur des paramètres rhéologiques du béton ne peut être prédite mais la classification des différents bétons est donnée par celle des pâtes correspondantes. Au niveau quantitatif, une simulation numérique est nécessaire pour obtenir la valeur de la viscosité du béton à partir de mesures sur la pâte de ciment ou sur le mortier. On présente dans cet article les deux approches et des exemples concrets.

Mots-clé : Rhéologie, simulations rhéologiques, béton, pâte de ciment

Abstract: The prediction of concrete rheological properties is essential for the correct use of the material. The composition of the concrete is nowadays complex. It is not limited to cement, aggregates and water but also includes admixtures and fillers. Therefore it is necessary to be able to optimize the composition of a concrete based on a simpler system and in a laboratory. The method that is presented here, will allow one to conduct measurements on cement paste, containing admixtures and fillers, and to predict the behavior of the concrete. The prediction is possible at two levels: qualitative and quantitative. At the qualitative level, the values of the concrete rheological properties cannot be predicted but the ranking of the various compositions considered is the same in cement paste and in concrete. At the quantitative level, a computer simulation is necessary to obtain the values of the concrete viscosity from the measurements on the cement paste or mortar. The two approaches will be presented here and some examples will be provided.

1. Introduction

Quand on parle de béton frais et de ses propriétés, très souvent on utilise des termes vagues tels qu'ouvrabilité, facilité de mise en œuvre, compacité, consistance, etc... Une méthode de mesure normalisée est le cône d'Abrams. Malheureusement cette mesure et les définitions des termes précédents ne sont pas basées sur des propriétés fondamentales du matériau. Récemment des progrès ont été réalisés dans la description du béton frais soit par des méthodes de mesure soit par des méthodes de prédiction [1].

Il est en général admis que le béton frais est un matériau Binghamien. Donc deux paramètres peuvent le décrire: la viscosité plastique et le seuil de cisaillement. D'autres modèles peuvent également être utilisés dans des cas spéciaux comme celui des bétons autoplaçants [2]. Dans cet article sont présentées deux méthodes pour prédire le

comportement du béton frais à partir de mesures sur pâte de ciment: une méthode qualitative et une méthode quantitative. Au niveau qualitatif, la valeur des paramètres rhéologiques du béton ne peut être prédite mais la classification des différents bétons est donnée par celle des pâtes correspondantes. Au niveau quantitatif, une simulation numérique est nécessaire pour obtenir la valeur de la viscosité du béton à partir de mesures sur la pâte de ciment ou sur le mortier.

2. Méthode qualitative: mesure de la compatibilité entre les constituants

Les interactions entre le ciment, les adjuvants et les additions minérales ne sont pas encore très bien comprises. Aujourd'hui, lors du développement d'un nouvel adjuvant, de l'utilisation de nouvelles additions minérales ou plus généralement de la formulation d'un béton, des essais sur béton sont

entrepris. La quantité de matériaux, le temps et la main d'œuvre nécessaires sont importants car de nombreuses combinaisons de matériaux peuvent être envisagées à des fins d'optimisation [3] et pour détecter les incompatibilités entre les matériaux. Etant donné que les adjuvants agissent en premier lieu sur le ciment, il serait logique de les tester sur la pâte de ciment uniquement. Une méthode a donc été développée qui permet de sélectionner la meilleure combinaison de ciment et d'adjuvants pour l'optimisation des propriétés rhéologiques. Cette méthode utilise un rhéomètre plan-plan. L'idée de base est de mesurer les propriétés rhéologiques de la pâte de ciment dans les mêmes conditions que celles dans lesquelles elle se trouve au sein du béton. Cela implique que les conditions de cisaillement et de température que subit la pâte pendant le malaxage et les mesures rhéologiques doivent reproduire les conditions de malaxage et la mise en œuvre du béton.

La méthode consiste à mélanger la pâte de ciment dans un malaxeur à haute turbulence. Cette méthode de mélange a été développée par la PCA (Portland Cement Association) [4]. La température du malaxeur est typiquement ajustée à $15\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ afin d'obtenir une pâte à $21\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. La vitesse est contrôlée à l'aide d'un système d'asservissement. Ceci a pour conséquence que le cisaillement subi par la pâte est indépendant de la résistance exercée par la pâte.

La mesure des propriétés rhéologiques de la pâte de ciment est effectuée à l'aide d'un rhéomètre plan-plan développé pour la mesure des propriétés rhéologiques de fluides tels que les huiles. Ce rhéomètre nécessite l'utilisation d'un millilitre de matériau par essai. La vitesse de cisaillement imposée s'étend de 3 à 50 s^{-1} . Des mesures de couple sont effectuées pendant les phases ascendante et descendante de la vitesse de cisaillement. Toutefois seule la partie descendante est utilisée pour déterminer la viscosité plastique et le seuil de cisaillement selon le modèle de Bingham.

Nous examinons ci-dessous des résultats obtenus sur pâtes et bétons et les potentialités d'une approche simplifiée sur pâte.

Prenons par exemple deux ciments de type I selon la classification ASTM et un superplastifiant. Différentes pâtes ayant un rapport eau/ciment de 0.40 ont été préparées et leurs paramètres de Bingham (seuil de cisaillement et viscosité plastique) mesurés. La Figure 1 montre les résultats obtenus. Il apparaît clairement que le ciment 2 a une demande en eau inférieure au ciment 1 et que l'ajout du superplastifiant n'apporte pas d'amélioration

significative des paramètres rhéologiques. Une analyse plus détaillée de la granularité et la composition des ciments pourrait sans doute expliquer cette différence mais elle sort du cadre de cette étude.

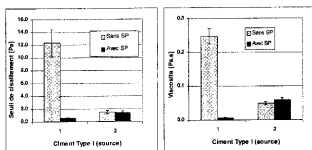


Figure 1: Compatibilité entre ciment et superplastifiant (SP). Les barres d'erreur correspondent à écart-type

Dans ce contexte, nous avons examiné la relation entre des pâtes de ciment et des bétons. Les pâtes ont été caractérisées avec le rhéomètre plan-plan et le béton par son affaissement au cône d'Abrams. Le but était de sélectionner la combinaison superplastifiant et additions minérales optimisant l'ouvrabilité du béton.

Une description complète de cette campagne d'essais est décrite dans la référence [5]. Cinq additions minérales ont été testées en faisant varier leur dosage (en substitution du ciment en unité de masse) et celui du superplastifiant. Seuls les résultats obtenus avec deux additions minérales seront présentés ici. Il s'agit d'une cendre volante ultrafine (UFFA) ($3\text{ }\mu\text{m}$ de diamètre moyen) et une fumée de silice (SF) ($0.1\text{ }\mu\text{m}$ de diamètre moyen). Le superplastifiant était de la famille des naphthalènes sulfonés.

La Figure 2 montre les résultats de mesures rhéologiques obtenus avec des pâtes de ciment à E/L constant de 0.35. Le taux de remplacement du ciment par les additions minérales est indiqué sur la figure. Une viscosité ou un seuil de cisaillement plus faible indiquent une ouvrabilité plus élevée. Donc par exemple, pour un seuil de cisaillement de 20 Pa, l'UFFA nécessite un dosage de superplastifiant d'environ 0.30 %, alors que SF demande un dosage de 0.80 %. La Figure 3 présente la demande en eau (à travers le rapport E/L, indiqué par le trait plein) et en superplastifiant de différents bétons ayant le même affaissement au cône d'Abrams ($200\text{ mm} \pm 10\text{ mm}$). La demande en superplastifiant est indiquée relativement au contrôle qui contient un dosage en superplastifiant de 655 mL/100kg de ciment et aucune addition minérale. Le mélange UFFA #3 a un rapport E/L et un dosage en superplastifiant inférieurs au contrôle, tandis que SF nécessite un dosage de superplastifiant et un rapport

E/L supérieur pour obtenir le même affaissement au cône d'Abrams.

En résumé, les figures 2 et 3 conduisent aux mêmes conclusions : l'addition d'UFFA améliore l'ouvrabilité par rapport au mélange de contrôle et à la fumée de silice.

Un des avantages des essais sur pâtes de ciment est que l'on peut très facilement les répéter et donc déterminer leur reproductibilité. Ceci devient difficile sur le béton à cause de la quantité de matériaux nécessaires alors que seulement 300 g de ciment sont utilisés par un essai sur pâte.

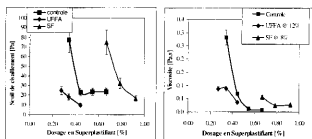


Figure 2: Seuil de cisaillement et viscosité de la pâte de ciment en fonction du dosage en superplastifiant et des additions minérales. Les barres d'erreur correspondent à un écart type.

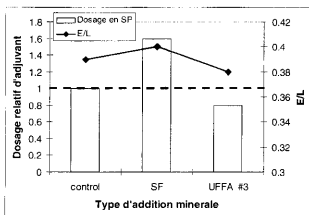


Figure 3: Résultats obtenus avec le béton. Les mélanges UFFA #3, #5 et #6 diffèrent uniquement par leur rapport E/C. Lire texte pour explications. Les valeurs indiquées étant le résultat d'un seul essai, une estimation de la marge d'erreur n'est pas possible.

3. Méthode quantitative: simulation par ordinateur

La méthode en cours de développement au NIST consiste à prédire les propriétés rhéologiques du béton ou du mortier à partir de leur composition et des propriétés rhéologiques du médium correspondant. Le médium est la pâte de ciment y compris l'adjuvant et l'addition minérale dans le cas

du mortier tandis que le mortier est le médium pour le béton. La mesure des propriétés rhéologiques du médium s'effectue en laboratoire avec un rhéomètre. La méthode utilisée pour la pâte de ciment à été décrite dans le paragraphe 2 ci-dessus. Une modification du rhéomètre et de la méthode est en cours pour les essais sur mortier. Le passage des propriétés du médium au béton se fait par la simulation sur ordinateur présentée ci-dessous.

La simulation est basée sur un modèle mésoscopique de fluides appelé "dynamique des particules dissipatives" (DPD - Dissipative Particle Dynamics) [6, 7, 8]. Ce modèle fusionne les notions d'automate cellulaire et de dynamique moléculaire. L'algorithme original DPD utilise des propriétés telles que la conservation de la masse, du moment, et l'invariance galiléenne, pour construire une série d'équations qui déterminent à tout moment la position des particules. Ces particules peuvent représenter une "agglomération" de molécules ou un volume fini de fluide. Des modifications ultérieures du modèle ont permis une formulation plus rigoureuse et une amélioration de la précision des calculs numériques. Un algorithme modélisant le mouvement d'objets de forme arbitraire dans le cadre du modèle DPD a été proposé par Koelman et Hoogerbrugge (KH) [7, 8]. Un objet rigide est représenté en "soudant" ensemble un groupe de particules placées aléatoirement dans le volume occupé par l'objet. Leur position est déterminée à tout moment en utilisant les équations d'Euler.

La méthode KH est en cours de modification par Martys pour l'appliquer à l'étude de l'écoulement du béton. La forme des granulats peut être facilement décrite par cette méthode. Il est donc possible de simuler les propriétés rhéologiques du béton à partir de sa composition.

Prenons comme cas d'étude un béton autoplaçant, qui par définition s'écoule à travers les obstacles sans aucune vibration. Le béton est simulé dans un premier temps par une suspension concentrée de granulats sphériques monodisperses dans un mortier. Le mortier est considéré comme un fluide newtonien homogène et est caractérisé par sa viscosité plastique. La distance entre les armatures est fixe mais la viscosité du médium (mortier), la dimension des granulats et la concentration en granulats sont variables.

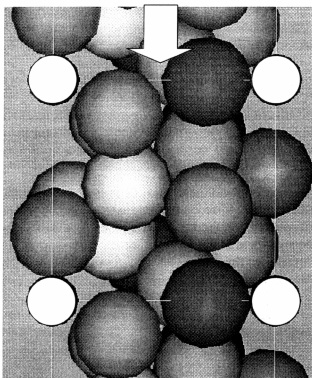
Les mécanismes de blocage peuvent ainsi être étudiés. Les informations qui peuvent être alors être déduites de cette simulation sont: 1) la vitesse d'écoulement; 2) la granulométrie optimale des granulats (gravillons); 3) la viscosité idéale du mortier; 4) la concentration idéale en granulats; et 5)

l'influence de la forme des granulats (sphériques, concassés...). L'opérateur peut ainsi étudier numériquement différents scénarios (sans avoir à gâcher de béton).

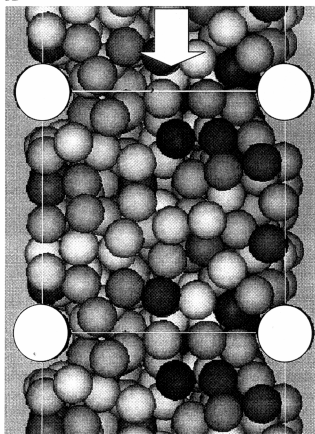
La Figure 4 montre deux exemples de résultats obtenus. Nous n'avons ici qu'une représentation à deux dimensions statique, mais toute la simulation est faite en 3-D. Ainsi, un film captant les images successives du flux peut être produit et différents points de vue peuvent être visualisés soit en représentation 2-D soit en 3-D sur un écran RAVE (Reconfigurable Advanced Visualization Environment) au NIST.

Dans l'exemple présenté, seule la dimension des granulats a varié. Les granulats étaient sphériques et leurs diamètre maximal représentait soit 1/5^{ème} soit la moitié de la distance libre entre les armatures. La concentration des granulats est, dans cet exemple, de 45% du volume (environ 1200 kg/m³). La seule force appliquée est la gravité terrestre. Il n'y a pas de force d'interaction entre les granulats. L'interaction entre les particules peut être simulée mais ceci n'est pas nécessaire pour des granulats. Elle le serait par contre pour la simulation de la pâte de ciment où se produisent des phénomènes d'agglomération et de répulsion dus à la présence d'adjuvants, par exemple, ou à l'hydratation.

Dans notre exemple de béton autoplaçant, nous avons calculé la vitesse des granulats. Les petits granulats (1/5^{ème}) coulent 40% plus vite que les gros granulats (1/2). On peut aussi remarquer que le mélange présente une porosité plus importante en aval des armatures et moins importante en amont. Cela est dû à l'effet de paroi et d'empiètement des armatures. On peut également remarquer que la distribution des granulats semble plus homogène dans le cas des petits granulats (Figure 4 B).



A



B

Figure 4: Simulation de l'écoulement d'un béton autoplaçant entre deux armatures. A) particules de diamètre 1/2 et B) particules de diamètre 1/5 de l'entrefer. Vue parallèle aux armatures représentées en cercles blancs. Le sens d'écoulement est selon la flèche

Un autre exemple pouvant être abordé par cette méthode concerne l'optimisation de rhéomètres à béton. La Figure 5 représente par exemple la simulation de l'écoulement du béton dans un rhéomètre à cylindres coaxiaux. On peut alors visualiser les risques de ségrégation ou de glissement du béton sur les parois. L'optimisation de l'aspect des parois pour éviter le glissement peut ainsi être menée de façon virtuelle sans qu'il soit nécessaire de construire plusieurs rhéomètres.

Pour le moment seuls les deux cas mentionnés précédemment (écoulement entre armatures et rhéomètres à cylindres coaxiaux) sont à l'étude mais des travaux sont actuellement envisagés pour simuler des rhéomètres de type plan-plan ou de type "two-point test" [9].

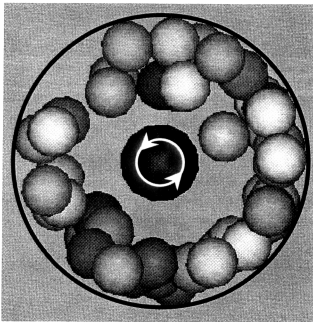


Figure 5: Simulation d'un rhéomètre coaxial. Le cylindre central tourne tandis que le cylindre extérieur est fixe.

4. Conclusion

En conclusion, il est envisageable dans un proche avenir de pouvoir réduire le nombre d'essais sur béton nécessaires à la mise au point d'une formule ayant une ouvrabilité fixée. Les adjuvants et les additions minérales peuvent être sélectionnés dans un premier temps en laboratoire, par des essais sur pâte de ciment ou sur mortier. Une simulation par ordinateur permettrait alors de déterminer les caractéristiques rhéologiques nécessaires pour la pâte et la proportion de granulats pour obtenir l'ouvrabilité requise sur béton.

Beaucoup de travail reste à accomplir pour valider les résultats obtenus sur la pâte de ciment, le mortier et les simulations par ordinateur.

5. Remerciements

Les auteurs remercient les personnes suivantes pour la relecture et leurs commentaires sur cet article: Denis Beaupré, Dale Bentz, Thierry Sedran, et Emil Simiu.

[1] Ferraris C., de Larrard F. and Martys N. , "Fresh Concrete Rheology", accepted for publication to "Material Science of Concrete" ed. by Jan Skalny, Vol. VI, 2001

[2] de Larrard F., Ferraris C. F., Sedran T. , "Fresh Concrete: A Herschel-Bukley Material" Materials and Structures, Vol. 31, #211, pp. 494-498, 1998

[3] Simon M.J., Bentz D.P., Fillibem J.F., "Concrete Optimization software Tool: User's Guide", Federal Highway Administration, 2001 available at <http://ciks.cbt.nist.gov/cost>

[4] Helmuth R., Hills L., Whitting D. , Bhattacharja S., "Abnormal Concrete Performance in the Presence of Admixtures" PCA # 2006 (1995)

[5] Ferraris C., Obla K., Hill R., "The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete", Cement and concrete Research Vol. 31/2, pp. 245-255 (2001)

[6] Groot R. D. and Warren P. B., "Dissipative Particle Dynamics: Bridging the Gap between Atomistic and Mesoscopic Simulation", J. Chem Phys. **107**, 4423-4435, (1997)

[7] Hoogerbrugge P. J. and Koelman, J. M. V. A., "Simulating Microscopic Hydrodynamic Phenomena with Dissipative Particle Dynamics", Europhys. Lett. **19**, 155-160, (1992)

[8] Koelman, J. M. V. A., Hoogerbrugge, P. J., "Dynamic Simulations of Hard-Sphere Suspensions Under Steady Shear", Europhys. Lett. , **21**, 363-368, (1993)

[9] Tattersall G.H., Banfill P.F.G. (1983), *The rheology of fresh concrete*, Pitman, London, 356