

# EFFET DE LA TAILLE DES GRANULATS SUR LE COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DES BETONS

## APPLICATION AUX BETONS AUTOPLACANTS

Naadia T.\* & Mouret M.\*\* & Kharchi F.\*\*\*

\*Laboratoire de génie civil, Université de Laghouat \*\*Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions, INSA / UPS, Toulouse \*\*\*Laboratoire du bâti dans l'environnement, U.S.T.H.B, Alger.

### RÉSUMÉ

Cette étude consiste à fractionner un béton auto plaçant par tamisage afin d'identifier le type de comportement rhéologique de chaque fraction et de trouver la relation entre ces comportements et celui du mélange total.

Les essais rhéométriques ont été réalisés au moyen d'un rhéomètre à mortiers et bétons (RHEOCAD), fonctionnant à vitesse imposée. Les résultats obtenus (moment résistant en fonction de la vitesse de rotation) montrent que le béton, ses fractions tamisées et sa pâte reconstituée (jusqu'aux grains de ciment et de filler) obéissent à un comportement viscoplastique rhéopaisissant de type Herschel-Bulkley. L'état rhéopaisissant est associé directement à la pâte (la matrice), les granulats ne peuvent qu'amplifier ou atténuer cet état par leur arrangement dans cette matrice.

Le couple seuil dynamique (indicateur du seuil de cisaillement) apparaît indépendant de la fraction tamisée, c'est-à-dire de la taille maximale des granulats ainsi que de la compacité du mélange, alors que la viscosité apparente décroît avec la diminution de ces paramètres.

Le mode de structuration par coconcentration volumique des grains solides (suspension polydispersés) peut mieux expliquer le comportement rhéologique d'un béton auto plaçant.

Le moment résistant dans les fractions du béton est lié linéairement par une droite de pente inférieure à 1, au moment résistant dans le mélange total. Cela explique que le comportement rhéologique d'un béton auto plaçant et de ses fractions sont régis par le même mode de structuration et c'est seulement l'échelle (la taille des granulats) qui diffère.

### Mots-Clés

Rhéologie - moment - vitesse - béton auto plaçant - fraction - état frais - tamisage.

## 1. INTRODUCTION

L'intérêt des chercheurs actuels à la rhéophysique des matériaux ne cesse de croître. Cette science a pour but d'expliquer et d'analyser les propriétés rhéologiques macroscopiques d'une suspension à partir du comportement des phases constitutives.

On se propose d'étudier le comportement rhéologique des fractions d'un béton auto plaçant (BAP) obtenus par tamisage du même béton à l'état frais. Notre but est d'identifier le type de comportement rhéologique de chaque fraction et de le relier avec celui du mélange total qui est le béton.

Cette étude rentre dans le grand objectif de reconstruire le comportement global en choisissant la méthodologie de fractionnement de la population granulométrique et surtout d'identifier le mode de structuration du béton frais en fonction du comportement rhéologique, à vrai dire de répondre à une question pertinente : est-ce que cette réponse rhéologique est liée directement à la concentration volumique des grains solides (suspensions polydispersés) ou plutôt à une concentration d'unités formées de grains entourés de pâte (suspensions floculées).

Les notions de compacité et d'empilement maximum (packing) des grains solides pour les deux cas (suspensions polydispersés et floculées) sont différentes. Pour la première, on parle d'empilement de grains et pour la deuxième, on parle d'empilement d'unités structurées.

## 2. APPAREILLAGE ET MATERIAUX UTILISES

### 2.1. Rhéomètre à mortiers et bétons

L'appareil utilisé pour les mesures rhéologiques est le rhéomètre RhéoCAD développé par la société CAD Instrumentation, et utilisé au laboratoire LMDC de Toulouse.

Ce rhéomètre permet d'effectuer des mesures rhéologiques sur des mortiers et des bétons qui contiennent des éléments de diamètres inférieurs à 12,5 mm. Il permet d'étudier une large gamme de comportements rhéologiques, du fluide newtonien à faible viscosité à la pâte épaisse à seuil de cisaillement élevé.

On mesure le couple résistant d'un échantillon de béton qui est cisailé par un mobile monté sur un axe vertical. Le fonctionnement est établi à vitesse imposée, la vitesse de rotation du mobile peut varier de 0.1 à 280 tr/min. Il existe différents types de mobiles ; une ancre (pour les mortiers et bétons), un cylindre crénelé (pour les pâtes et mortiers) et un mobile à ailettes (pâtes et

mortiers). La gamme de mesure du couplemètre est située entre 0.1 N.cm et 1000 N.cm. L'ancre a été employée pour tous les mélanges testés.

Les mesures faites au RhéoCAD sont imprécises dans la gamme de faibles valeurs de couple (c'est le cas des pâtes), pour laquelle les variations de couples (inférieures à 1 N.cm) sont dans la limite de l'appareil. Pour plus de précisions sur le comportement à l'écoulement de la pâte, on a également utilisé un appareil adapté pour les mesures de faibles couples qui est le viscosimètre Rotovisco RV2. C'est un appareil identique à celui développé par Legrand. La géométrie de mesure utilisée est à cylindres coaxiaux à faible entrefer (rapport des rayons externe et interne < 1,15) si bien qu'on admet une contrainte et un gradient de déformation constants dans tout l'entrefer.

### 2.2. Matériaux et composition du béton

Les essais sur béton auto plaçant ont été effectués au LMDC. Le sable et le gravier proviennent de la Garonne, de type roulé. Le ciment est un CEM I 52.5R et le superplastifiant est de type copolymère acrylique. Les détails de composition du béton auto plaçant et de sa pâte sont donnés par le tableau 1.

Tableau 1 : Composition du béton auto plaçant (BAP) et de sa pâte (essais rhéologique)

		Béton Auto plaçant	Pâte	Observations
Eau efficace	Kg	170	170	
Ciment	Kg	350	350	Surf. spécif. Blaine = 4200cm <sup>2</sup> /g Mv= 3128kg/m <sup>3</sup> et d50=15µm
Sable (0/4mm)	Kg	860	-	Mv= 2620Kg/m <sup>3</sup> Absorption (Abs= 1.2%)
Gravier (4/10mm)	Kg	840	-	Mv= 2670 Kg/m <sup>3</sup> Absorption (Abs= 1%)
Filler calcaire	Kg	150	150	Surf. spécif. Blaine=4000cm <sup>2</sup> /g Mv= 2698Kg/m <sup>3</sup> et d50= 15µm
Superplastifiant	Kg	2.38	2.38	Densité (d=1.084) Extrait sec (ES=34%) SP/C=0.68% en masse
E efficace / C		0.486	0.486	
E efficace / L		0.34	0.34	
Air occlus théorique	%	1.7	-	
Masse volumique apparente théorique	Kg/m <sup>3</sup>	2372	1987	

**2.3. Procédures expérimentales**

On confectionne un volume qui correspond à 40 litres de béton autoplaçant puis on procède au tamisage de notre mélange total au tamis 2 et 6.3 mm pour avoir deux fractions du béton : le BAP 2 (un mortier), dont les granulats sont inférieurs ou égaux à 2mm (76% de la classe du sable 0/4) et un BAP 6.3, dont les granulats sont inférieurs ou égaux à 6.3mm (100% de sable 0/4 et 36.6% de gravier 4/10).

Pour considérer la fraction pâte qui est la matrice du béton, on procède à la confection d'un volume qui correspond à 6 litres de pâte, constituée de ciment, de filler, d'eau et du superplastifiant. Cette composition est censée être représentative de celle du mélange total (béton) puisqu'elle est réalisée dans les mêmes proportions de constituants que celle du béton : même quantité d'eau efficace, mêmes quantités de ciment, de filler et de superplastifiant pour un volume de 1 mètre cube.

Ayant les trois fractions (pâte, BAP2 et BAP6.3), on étudie leur écoulement pour les comparer à l'écoulement du mélange total (BAP) selon l'organigramme donné par la figure 1.

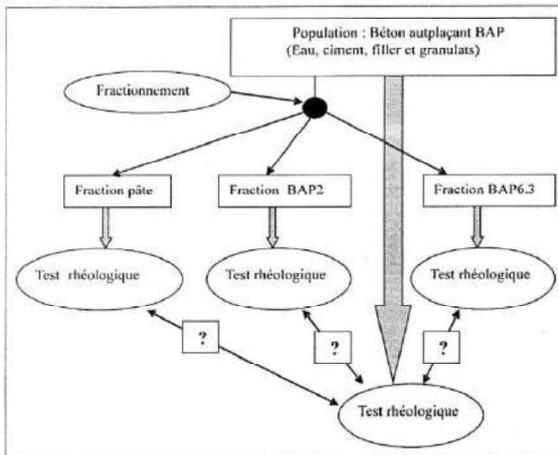


Figure 1 : Organigramme récapitulatif de la méthodologie de l'étude

La procédure de malaxage utilisée pour la confection du béton est donnée ci dessous :

- homogénéisation à sec du sable, du gravier, du ciment et filler dans le malaxeur pendant 30 s;
- ajout de l'eau et malaxage pendant 2min et 30s;
- ajout du superplastifiant et malaxage pendant 2min et 30s.

Immédiatement après malaxage, un essai d'étalement au cône d'Abrams nous a donné une galette homogène de diamètre égal à 76 cm, sans auréole de laitance en périphérie. Ces observations témoignent du comportement admis en écoulement autoplaçant. Ensuite, on a procédé au tamisage de notre béton, pour obtenir les fractions requises. Enfin, on a effectué les essais au rhéomètre RhéoCAD. Le mode opératoire des essais rhéométriques est le suivant :

- le matériau est placé dans la cuve, et laissé au repos pendant une minute;
- on impose au matériau une vitesse de 5tr/min pour évaluer le couple seuil à partir duquel le matériau s'écoule (seuil statique);
- on réalise une montée rapide en vitesse jusqu'à 60 tr/min pour déstructurer le matériau et s'affranchir de ses propriétés dépendantes du temps (propriétés de thixotropie notamment). En considérant alors que le matériau est suffisamment déstructuré pour qu'il n'ait aucune mémoire de sa structure initiale, on attend la stabilisation du couple et quand cette stabilisation est atteinte

(régime permanent d'écoulement), on passe à la vitesse inférieure et ainsi de suite jusqu'à 5tr/min. Cette méthodologie est appliquée au LMDC depuis les travaux de Legrand [01] et citée dans l'étude [02].

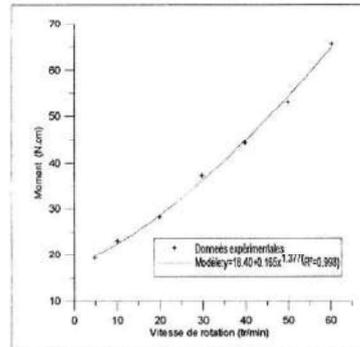
Les paramètres mesurés sont la vitesse de rotation du mobile (tours par minute) et le couple résistant au mouvement (N.cm). Le passage aux grandeurs fondamentales reste bien sûr lié à l'étalonnage du rhéomètre, mais l'évolution du couple résultant en fonction de la vitesse de cisaillement imposée est suffisante pour décrire le comportement rhéologique des mélanges testés.

Pour tracer le couple en fonction de la vitesse de rotation, il faut prendre les 5 à 10 dernières valeurs du couple pour chaque vitesse, ce qui correspond au régime permanent d'écoulement (couple à peu près stable) et faire la moyenne des points vitesse correspondants.

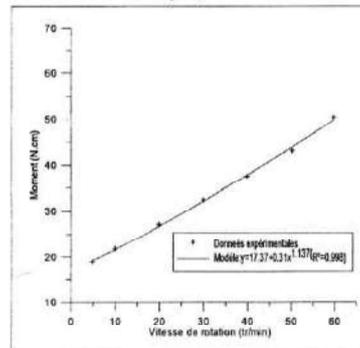
On note que le BAP2mm a été caractérisé plus tard que le béton et sa fraction BAP6.3 à cause du tamisage qui a pris du temps. Le cisaillement a donc été appliqué sur un matériau qui présentait une structure différente en raison de l'avancement des réactions d'hydratation : en effet BAP2 avait une structure pâteuse intermédiaire entre l'état fluide du béton frais et l'état solide de tout béton durci. On peut alors comprendre que les paramètres d'écoulement présentés plus loin pour cette fraction sont supérieurs à ceux qui auraient été évalués à une échéance voisine de celle du béton et de sa fraction BAP6.3.

**3. RESULTATS EXPERIMENTAUX**

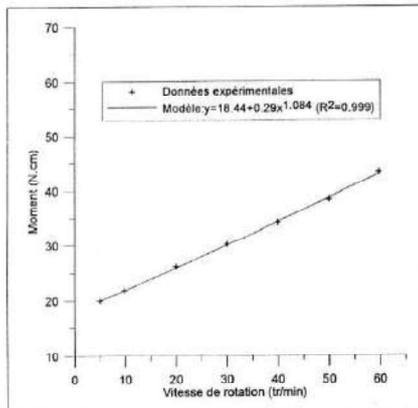
La figure 2 illustre les courbes (Moment M - Vitesse de rotation V) du béton autoplaçant et de ses fractions (BAP6.3, BAP2, et la pâte). Les points expérimentaux sont modélisés avec une courbe d'ajustement non linéaire de type Herschel-Bulkley ( $M=a+bV^n$ ) et les valeurs des paramètres sont données sur la figure 2. Ces paramètres sont au nombre de trois comme souligné [02], [03] et [04] pour le cas des bétons autoplaçants.



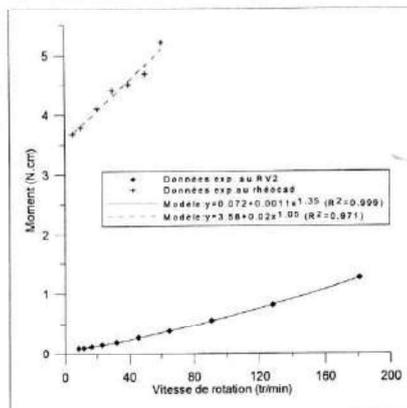
a- Le béton autoplaçant entier BAP



b- La fraction du béton autoplaçant BAP6.3



c- La fraction du béton autoplaçant BAP2mm



d- La pâte (jusqu'à la fraction solide ciment+filler)

**Figure 2.** : Courbes des moments en fonction de la vitesse de rotation pour le béton autoplaçant (BAP) et ses fractions (BAP6.3, BAP2 et pâte) lissées par des équations d'ajustement de type  $M=a+bV^n$ .

Le comportement observé pour le béton autoplaçant, ses deux fractions et sa pâte sont de type viscoplastique rhéoépaississant. L'exposant « n » est supérieur à 1, voire proche de l'unité. Pour la pâte, on note le même comportement que celui mis en évidence dans l'étude de Cyr et al [05] pour les pâtes de ciment avec superplastifiant. Pour plus de précisions sur le comportement à l'écoulement de la pâte, on opte pour les résultats donnés par le viscosimètre Rotovisco RV2, alors que le RhéoCAD devient imprécis pour détecter les variations dans les faibles valeurs de couple (voir figure 2.d).

Pour le béton autoplaçant et ses deux fractions, on note que le rhéoépaississement est d'autant moins marqué que la taille maximale des granulats diminue. L'exposant « n » de la relation d'ajustement du moment en fonction de la vitesse de rotation pour le BAP2 est en effet inférieur à celui du BAP6.3 qui est inférieur à son tour à celui du BAP entier. En passant du BAP entier aux fractions 6.3mm puis 2mm, le comportement devient presque linéaire (type Binghamien).

On peut penser que le comportement rhéoépaississant est associé directement à la pâte. En s'appuyant sur le raisonnement établi par Cyr et al [05], ce comportement peut apparaître dans une suspension colloïdale ou supposée comme telle (pâte de ciment) dès lors qu'elle présente une concentration volumique en solides non négligeable et qu'elle est en même temps dispersée. Les

conditions sont réunies dans la pâte étudiée : les solides (ciment + filler essentiellement) occupent 50% du volume total et sont dans un état non floculé en raison de la présence du superplastifiant ; à l'équilibre, ils se repoussent mutuellement par le biais des forces électrostatiques et de Van der Waals, comme cela se passe dans certaines suspensions colloïdales concentrées. Lorsqu'il apparaît en écoulement, ce comportement est essentiellement lié au superplastifiant dont les chaînes polymériques pourraient être localement « détachées » des grains solides, lorsque l'intensité du cisaillement augmente. Cela a deux conséquences.

- Le polymère détaché retourne dans le suspensant (eau + ions en solutions) et entraîne l'augmentation de sa viscosité;

- Les grains solides partiellement dégagés du superplastifiant peuvent se rapprocher les uns des autres sous l'effet des forces de cisaillement et former des « groupes hydrodynamiques » qui gênent temporairement l'écoulement.

En ajoutant des grains de plus en plus gros qui ne jouent un rôle dans l'écoulement que par leur nombre et la masse correspondante (c'est le cas lorsque la dimension dépasse 100µm), l'état rhéoépaississant de la pâte ou de la matrice qui, elle joue le rôle de la composante visqueuse dans l'écoulement du matériau global, a toutes les raisons d'être maintenu. C'est ce que l'on remarque en comparant le comportement de la pâte avec ceux des tamisats puis enfin celui du béton. On peut penser que ce comportement pourrait être amplifié en raison du confinement de plus en plus sévère de la phase la plus fine (< 100 µm) entre les grains, en passant des tamisats au béton. En effet, la distribution granulométrique de plus en plus étendue lorsqu'on tend vers le béton entraîne un arrangement de plus en plus compact.

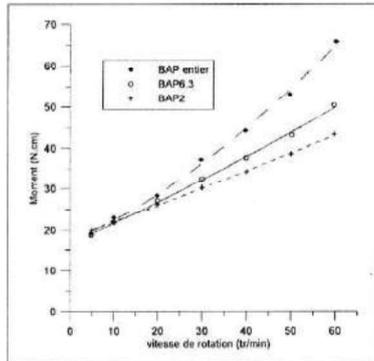
Les résultats donnés par le rhéomètre RhéoCAD sont bruts et ne permettent pas pour l'instant d'avoir directement accès aux paramètres physiques du comportement rhéologique représenté par la loi entre la contrainte de cisaillement et le gradient de vitesse selon le modèle Herschel-Bulkley  $\tau = \tau_0 + m\dot{\gamma}^n$ , où  $\tau_0$ , m et n sont les paramètres caractérisant l'écoulement du matériau utilisé. On note cependant qu'on peut identifier la tendance du seuil de cisaillement en fonction de la taille maximale des granulats d'un béton autoplaçant à partir du facteur « a » (voir le tableau 2 et la figure 3a) qui est le couple ou moment seuil dynamique. Ce couple seuil dynamique est sensiblement constant, donc indépendant de la taille maximale des granulats ainsi que de leur concentration dans le volume du mélange. Cela laisserait penser que le seuil dépend essentiellement des propriétés de cohésion de la pâte dans le béton. Ces résultats méritent d'être confirmés en testant notamment la fraction BAP2 à une échéance comparable à celle de BAP et BAP6.3.

**Tableau 2 :** Les paramètres des courbes d'ajustement par le modèle Herschel-Bulkley

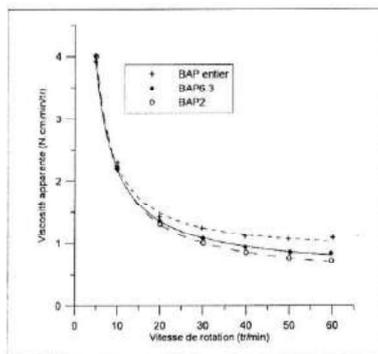
Paramètres	a	b	n
BAP entier	18.4	0.165	1.38
BAP6.3	17.37	0.31	1.14
BAP2	18.44	0.29	1.08
Pâte	0.072	0.0011	1.35

Pour identifier les propriétés de viscosité des mélanges, on se propose de calculer un coefficient de viscosité apparente qui est le rapport entre le couple moyen et la vitesse de rotation correspondante. Cette grandeur est bien sûr dépendante du comportement du matériau et de la géométrie du système de

mesure, mais elle donne une image correcte de la viscosité apparente. Pour n'importe quelle vitesse de rotation, on note que le coefficient de viscosité apparente diminue avec la taille des grains et dans une moindre mesure, avec leur concentration dans un volume donné de mélange (voir La figure 3b).



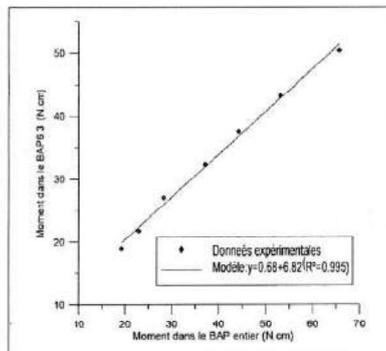
a- Données expérimentales des moments lissées au modèle Herschel-Bulkley



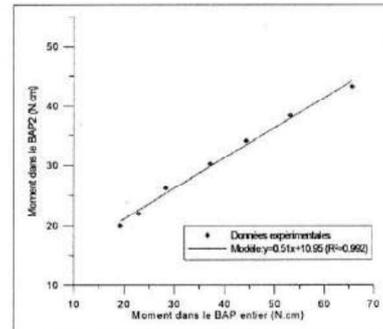
b- Données expérimentales des viscosités apparentes

Figure 3 : Courbes des moments et des viscosités apparentes en fonction de la vitesse de rotation pour le BAP, BAP6.3 et le BAP2.

En terme de participation de chaque fraction de béton autoplaçant dans le comportement global du mélange total (BAP entier), il existe une relation linéaire, entre le moment mesuré dans chaque fraction et le moment dans le mélange total. La pente de la droite est décroissante lorsque le diamètre maximal dans les fractions diminue. Elle prend les valeurs 0,68, et 0,51 respectivement pour le BAP6.3 et le BAP2. (Voir figure 4).



a- La fraction du béton autoplaçant BAP6.3mm.



b- La fraction du béton autoplaçant BAP2mm.

Figure 4 : Courbes des moments induit dans chaque fraction en fonction du moment induit dans le béton (mélange total), lissées par des droites ( $y=ax+b$ ).

#### 4. CONCLUSION :

Au terme de cette étude, il apparaît que le comportement rhéologique d'un béton autoplaçant est non linéaire, rhéoépaississant, de type Herschel-Bulkley. L'état rhéoépaississant est associé directement à la pâte (la matrice), les granulats ne pouvant qu'amplifier ou atténuer cet état par leur arrangement dans cette matrice, du fait des propriétés du squelette granulaire résultant (compacité, granulométrie).

Le caractère rhéoépaississant semble en effet être atténué en allant du mélange total vers la fraction tamisée de plus petite taille des granulats.

D'autre part, si les propriétés de viscosité apparente diminuent pour chaque vitesse imposée, lorsque la taille des grains et leur concentration volumique diminuent dans le mélange, le seuil d'écoulement semblerait rester sensiblement constant et dans ce cas il ne dépendrait que des propriétés de la matrice du béton. Cela reste à vérifier, notamment en conservant seulement du béton les grains solides de dimension inférieure ou égale à 100 µm puisqu'ils jouent un rôle dans l'écoulement du matériau global seulement par leur surface.

#### 5. REMECIEMENTS

Je tiens à remercier les responsables du laboratoire matériaux et durabilité des constructions (LMDC), INSA/UPS de Toulouse et notamment Mr M. MOURET, maître des conférences et Mme G. ARLIGUIE, directrice du laboratoire pour m'avoir accueilli, permis et aider à réaliser cette étude.

#### 6. BIBLIOGRAPHIE

- [01] C. Legrand « Contribution à l'étude de la rhéologie du béton frais » Matériaux et Construction 5 (29), 1972 pp. 275-295.
- [02] M. Mouret, M. Cyr « A discussion of the paper : the effect of measuring procedure on the apparent rheological properties of self compacting concrete by R.M Geiker et al » Cement and Concrete research 33, 2003, pp. 1901-1903.
- [03] F.Delarrard « Structures granulaire et formulation des bétons » O.A.34 Edition LCPC, Avril 2000.
- [04] T.Sedran « Rhéologie et rhéométrie des bétons. Application aux bétons autonivelants » Thèse de doctorat, Ecole nationale des ponts et chaussées, 1999.
- [05] M. Cyr, C. Legrand, M. Mouret « Study of the shear thickening effect of superplasticizers on the rheological behaviour of cement pastes containing or not mineral additives » Cement and Concrete Research 30, 2000, pp. 1477-1483.