
Vers une réelle rhéométrie adaptée aux bétons frais

Christophe Lanos, Patrice Estellé

UEB- Laboratoire Génie Civil Génie Mécanique, Equipe Matériaux et Thermo-Rhéologie

IUT Rennes, 3 rue du Clos Courtel BP 90422, 35 704 Rennes Cedex 7

christophe.lanos@univ-rennes1.fr

patrice.estelle@univ-rennes1.fr

RÉSUMÉ. Dans la première partie de ce travail, on se propose de comparer le comportement rhéologique de bétons identifié à l'aide de différents rhéomètres, en utilisant une méthode de traitement des données permettant le tracé direct de la courbe d'écoulement du matériau. Dans une deuxième partie, les propriétés rhéologiques de bétons industriels sont étudiées au moyen d'un rhéomètre de forte capacité de couple muni d'une géométrie à ailettes. Les résultats permettent d'évaluer et de comparer les propriétés d'écoulement des bétons et de juger de la reproductibilité du procédé de fabrication.

ABSTRACT. In the first section of this paper, the rheological behaviour of concretes obtained with different rheometers is investigated from a procedure allowing the plot of the flow curve of sheared material. Secondly, the rheological properties of industrial concretes are studied with a high torque vane rheometer. The flow properties of concrete are evaluated and compared, as well as the reproductibility of the making process of concrete.

MOTS-CLÉS : rhéomètre, courbe d'écoulement, rhéologie des bétons.

KEY WORDS: rheometer, flow curve, concrete rheology.

1. Introduction

La rhéométrie sur les bétons frais pose toujours de nombreux problèmes. Leur origine est liée à la taille des occlusions, à la présence de seuils d'écoulement élevés, aux phénomènes évolutifs de prise et de durcissement. Des essais empiriques (affaissement, étalement, maniabilimètre LCL, L-Box, Boite LCPC) permettent d'évaluer le seuil d'écoulement de ces matériaux. Ils fournissent cependant peu d'information quant à leur viscosité, ainsi qu'à l'évolution de leur comportement sous cisaillement. Dans ce but, des appareils de mesure adaptés à ces fluides fermes ont déjà été développés et présentent généralement des géométries classiques mais de grande taille : vane test -appareil ICAR (Koeler, 2004 ; Koeler et al., 2005) -, outils tournants - Two point test (Domone et al., 1999) -, appareil IBB (Baupré, 1994), cylindres coaxiaux - appareil BML (Wallewik, 1990 ; Wallewik et Gjorv, 1990)), plan-plan - BTRheom (De Larrard et al., 1993 ; De Larrard et al., 1996). Les résultats de ces tests sont généralement simplement interprétés en comparant les valeurs des paramètres rhéologiques estimés (seuil de plasticité, viscosité plastique ou consistance, index...) (Banfill et al., 2001 ; Ferraris et Brower, 2004).

Dans la première partie de cet article, nous proposons de revisiter des études rhéologiques comparatives réalisées avec différents rhéomètres à béton existants, en interprétant différemment les données expérimentales, selon une procédure détaillée plus loin. Ceci permet de discuter des différences de comportement notées pour un même béton selon la géométrie d'essai utilisée.

Dans une deuxième partie, on se propose d'étudier le comportement rhéologique de différents bétons fabriqués et mis en œuvre dans un contexte industriel. Ceci est réalisé au moyen d'un rhéomètre développé par l'équipe, reprenant une géométrie proche de celle de l'appareil ICAR (Koeler, 2004), et adapté à la consistance des bétons. On s'intéresse en particulier à l'évaluation des seuils statiques et dynamiques de ces matériaux, ainsi qu'à l'identification de leur courbe d'écoulement. Les essais réalisés sur différents types de bétons permettent d'identifier les paramètres caractéristiques du comportement rhéologique de ces matériaux et permettent également de juger de la reproductibilité de gâchées successives, réalisées dans un cadre industriel. Des conclusions relatives à la régularité (ou non) de la formulation et/ou de la fabrication des bétons sur site de production sont tirées de ces travaux qui permettent en outre d'associer une gamme de consistance optimisée pour chacun des procédés industriels de mise en œuvre étudiés.

2. Exploitation des données issues de la littérature

Différents bétons ont été testés avec des rhéomètres à béton dans le cadre de deux campagnes d'essais comparatifs (Banfill et al., 2001 ; Ferraris et Brower, 2004). Pour la première, 12 bétons fermes et plastiques (avec des granulats roulés ou concassés, ajout de fluidifiant, ciment portland commercial CEM I 52,5) ont été testés. Lors de la

deuxième campagne, 16 bétons dont une majorité de bétons fluides autoplaçants ont été étudiés. Le but de ces essais était initialement d'identifier des corrélations entre les résultats obtenus avec différents appareils. L'appareil du Cemagref, développé par Coussot (1993), est utilisé comme référence. Lors des deux campagnes, les appareils ont été réunis et mis en œuvre simultanément avec du béton provenant d'un même mélange. En parallèle, des mesures d'étalement et/ou d'affaissement ont été réalisées sur ces bétons.

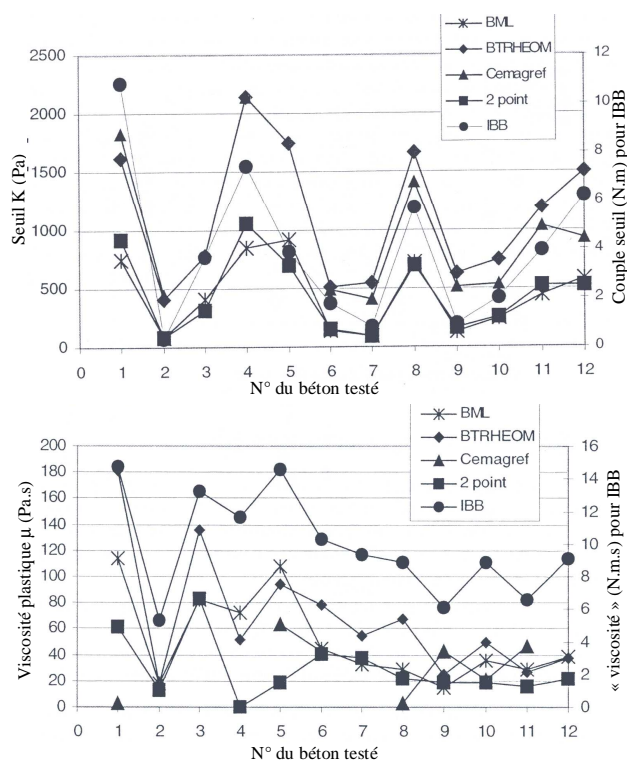


Figure 1. Valeurs des paramètres rhéologiques (K et μ) identifiés sur les 12 bétons étudiés par Banfill et al., (2001) avec différents appareils.

Lors des essais, les mesures de couple M sont systématiquement réalisées en imposant les vitesses de rotation Ω (décroissantes, par paliers). L'analyse des résultats consiste à ajuster sur les enregistrements la réponse théorique du cisaillement d'un fluide viscoplastique (modèle de Bingham dans les exemples présentés), le tout éventuellement accompagné d'hypothèses réductrices vis-à-vis de la géométrie utilisée (entrefer étroit). L'ajustement n'impose pas de lissage des données qui peuvent être souvent bruitées.

Les valeurs des paramètres rhéologiques ainsi identifiés (seuil de plasticité K et viscosité plastique μ) sont alors comparées. La figure 1 illustre les résultats obtenus lors de la première campagne (Banfill et al., 2001). On constate que les paramètres identifiés

pour chaque appareil ne peuvent être considérés comme intrinsèques. Les résultats issus de la seconde campagne sont de la même teneur. L'estimation des coefficients de corrélation globaux (tout béton confondus) associés aux paramètres K et μ identifiés pour les différents appareils montre que certains couples d'appareils sont « équivalents », en particulier vis-à-vis des seuils d'écoulement. On note d'un fluide à l'autre que les évolutions de ce paramètre sont assez semblables quel que soit l'appareil utilisé, même si en valeur absolue les écarts sont importants. Ces résultats bien qu'encourageants ne sont ponctuellement pas satisfaisants.

2.1 Méthode de calcul des vitesses de cisaillement

La ré-exploitation des résultats obtenus avec les différents rhéomètres lors des campagnes d'essai comparatives citées précédemment est envisagée en ayant recours aux procédures décrites ci-après. L'objectif est de générer les courbes d'écoulement des bétons et de les comparer, en calculant pour chaque appareil une valeur de vitesse et de contrainte de cisaillement caractéristiques d'une mesure de couple et de vitesse de rotation. Parmi les appareils utilisés, on peut distinguer des rhéomètres de type cylindres coaxiaux (Couette) ou vane, outils tournants ou appareil de torsion plan-plan.

2.1.1 Géométrie Couette ou vane

La relation contrainte-vitesse de cisaillement dans une géométrie Couette est établie en considérant localement le fluide en écoulement comme étant un fluide de Bingham (Estellé et al., 2008a). Pour un tel fluide, l'expression de la vitesse de cisaillement dépend du régime d'écoulement dans l'entrefer. Ainsi, la vitesse de cisaillement s'exprime par les équations [1] et [2], lorsque respectivement le fluide est partiellement cisailé, complètement cisailé dans l'entrefer.

$$\dot{\gamma} = 2M \frac{d\Omega}{dM} \quad [1]$$

$$\dot{\gamma} = 2 \frac{M \frac{d\Omega}{dM}}{\left(1 - \frac{R_b^2}{R_c^2}\right)} - \frac{\Omega - M \cdot \frac{d\Omega}{dM}}{\ln\left(\frac{R_b}{R_c}\right)} \quad [2]$$

Où R_b et h désignent le rayon et la hauteur du cylindre interne, et R_c est le rayon externe. Ω et M représentent respectivement la vitesse de rotation du cylindre interne et son couple.

Le principe de maximisation de la dissipation d'énergie au sein de l'écoulement permet de distinguer la vitesse de cisaillement caractéristique entre les équations [1] et [2], sans une évaluation préalable du seuil d'écoulement du matériau lorsque celui-ci en possède un. Ainsi à partir d'une rampe croissante et/ou décroissante en vitesse de

rotation Ω_j , on peut calculer la vitesse de cisaillement, ainsi que la contrainte correspondante à partir de l'équation [3].

$$\tau = \frac{1}{2}(\tau_j + \tau_{j-1}) \text{ avec } \tau_j(M) = \frac{M_j}{2.\pi.h.R_b^2} \quad [3]$$

Notons que la dérivée $\frac{d\Omega}{dM}$ est simplement approchée par $\frac{\Omega_j - \Omega_{j-1}}{M_j - M_{j-1}}$.

Cette procédure d'obtention d'une courbe d'écoulement dans une géométrie Couette a été testée et validée pour différents fluides et tailles d'entrefer (Estellé et al., 2008a). Elle a été étendue avec succès à une géométrie vane pour plusieurs types de matériaux (Estellé et al., 2008b), ainsi qu'à des géométries de mélange (Estellé et Lanos, 2008c). Il est donc possible de tracer point par point la courbe d'écoulement du fluide testé à partir des données expérimentales de couple et de vitesse de rotation. La même procédure est utilisée en présence d'outils tournants simplement immergés dans le béton. Le rayon R_b , alors considéré correspond au rayon d'encombrement de l'outil.

2.1.2 Géométrie plan-plan

Le BTRheom, appareil utilisé par De Larrard et al. (1993) et De Larrard et al. (1996), correspond à une géométrie plan-plan spécifique. Pour des raisons techniques, le domaine cisailé correspond à un cylindre creux. La motorisation placée sous l'appareil transmet la rotation au disque supérieur de l'appareil à l'aide d'un axe. Sur les surfaces cylindriques, le béton glisse sur des surfaces métalliques lisses. Le frottement sur ces surfaces sera négligé. De Larrard et al. (1993) proposent la solution de l'expression du couple M en fonction de Ω pour cette géométrie, dans le cas d'un fluide de Bingham. Nous proposons d'évaluer une vitesse de cisaillement caractéristique de l'écoulement pour un tel fluide. La vitesse moyenne de cisaillement à la surface du disque supérieur s'écrit (Lanos et Estellé, 2007) :

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{\pi.(R_2^2 - R_1^2)} \cdot \int_{R_1}^{R_2} \Omega \cdot \frac{r}{h} \cdot 2.\pi.r.\partial r = \frac{2.\Omega.(R_2^3 - R_1^3)}{3.h.(R_2^2 - R_1^2)} \quad [4]$$

Pour un fluide de Bingham, le couple M appliqué au plateau supérieur est calculé par intégration puis dérivé afin d'obtenir les équations suivantes:

$$\partial M / \partial \Omega = \frac{2.\pi.\mu.(R_2^4 - R_1^4)}{4.h} \quad [5]$$

$$M - \Omega \cdot \frac{\partial M}{\partial \Omega} = \frac{2.\pi.K.(R_2^3 - R_1^3)}{3} \quad [6]$$

Les équations [5] et [6] permettent d'évaluer K et μ pour un couple de valeur (Ω, M) . Un point de la courbe d'écoulement du fluide est donc identifié avec la vitesse de

cisaillement moyenne donnée par l'équation [4] et la contrainte de cisaillement associée :

$$\tau = K + \mu \cdot \dot{\gamma} \quad [7]$$

Il est donc possible ici aussi de tracer point par point la courbe d'écoulement du fluide testé à partir de la courbe d'enregistrement (M en fonction de Ω).

2.2 Synthèse des résultats

Quelques exemples de résultats de traitement des courbes (Ω, M) extraites des travaux de Banfill et al. (2001), selon les méthodes décrites ci-dessus, sont commentés ici. Les bétons sélectionnés, n° 6a et 8a correspondent respectivement à un béton fluide presque autoplaçant et un béton ferme. Selon Roussel et Coussot (2005), l'affaissement obtenu (respectivement 21,7 cm et 13 cm) permet d'estimer un seuil statique de respectivement 1140 Pa et 2270 Pa.

Comme le montre la figure 2, les différents appareils ne permettent pas d'identifier une courbe d'écoulement unique et caractéristique pour chaque béton testé. Les appareils de type outil tournant (Two points test et IBB) fournissent les résultats les moins cohérents. Les gammes de vitesse de cisaillement induites par ces outils sont souvent étendues. Assimiler l'outil tournant à un cylindre n'est donc pas opportun. Les appareils de type cylindres coaxiaux (BML et Cemagref) génèrent des gammes de vitesse de cisaillement souvent différentes. Le BML produit une courbe d'écoulement souvent en deçà de la courbe associée à l'appareil de référence du Cemagref. Il se trouve qu'avec le BML, l'entrefer est relativement réduit (45 mm) alors que les grains les plus gros des bétons testés vont jusqu'à 20 mm. Il est donc probable qu'un glissement soit induit au voisinage des surfaces des cylindres dans le BML. L'effet de ce glissement semble plus important pour le béton 8-a (granulat roulé majoritairement de classe granulaire 10/20) que pour le béton 6-a (granulat concassé majoritairement de classe granulaire 10/16). L'interprétation des résultats nécessiterait alors d'être revue en intégrant dans le champ de vitesse des effets liés au glissement aux parois. On constate que les modèles proposés pour les bétons testés (valeur de K et μ identifiées par les auteurs de ces essais) sont assez voisins des courbes d'écoulement identifiées selon notre procédure dans le cas des tests réalisés avec le BTRheom et l'appareil du Cemagref. Notons que la gamme de vitesse de cisaillement couverte par le BTRheom est plus basse. La courbe d'écoulement identifiée avec le BTRheom est au dessus de la courbe obtenue avec l'appareil du Cemagref. Rappelons que pour dépouiller les mesures réalisées avec le BTRheom, les effets de frottement du béton sur les parois cylindriques de l'appareil ont été négligés. La prise en compte de ces effets aurait certainement pour conséquence d'améliorer la superposition des courbes d'écoulement identifiées avec ces deux appareils. Notons cependant que les seuils statiques estimés par la mesure de l'affaissement sont largement plus élevés que les seuils déduits des différentes courbes d'écoulement.

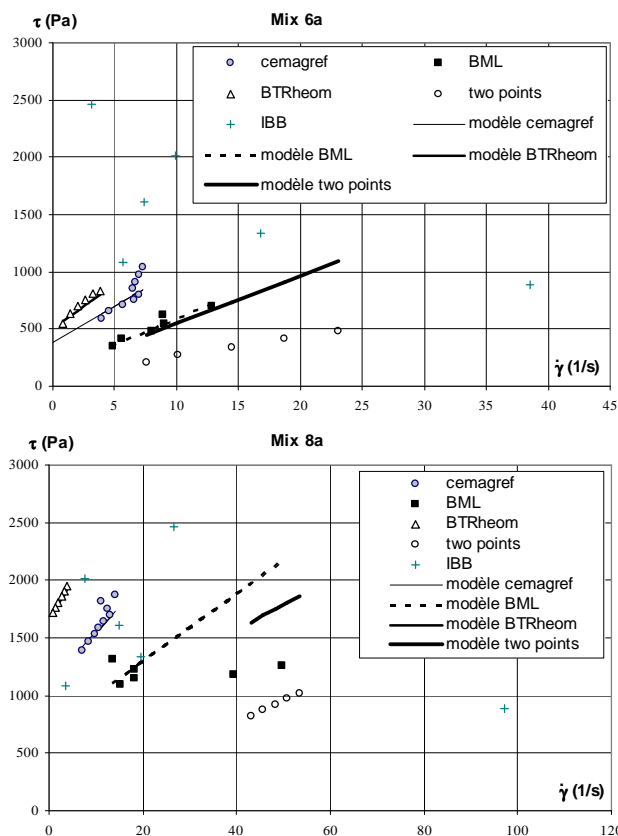


Figure 2. Courbes d'écoulements identifiées à l'aide des différents tests pour les bétons 6a et 8a. Les courbes modèles correspondent aux identifications de Banfill et al. (2001).

3. Conception d'un rhéomètre et exploitation dans un cadre industriel

3.1 Appareil développé et protocole expérimental

Des conclusions nécessaires à la conception optimisée d'un rhéomètre à béton découlent de l'analyse précédente. Un appareil de type cylindre tournant à large entrefer permet d'éviter les problèmes de glissement à la paroi. L'entrefer peut avantageusement être de l'ordre de 10cm. Une géométrie de type vane ou Couette présente la procédure de dépouillement la plus précise pour identifier la courbe d'écoulement du matériau testé. La gamme de vitesse de cisaillement à couvrir varie entre 0 et 10 s^{-1} . La gamme de contrainte varie entre 0 et 10 kPa selon les bétons. Ces considérations ont été validées sur un rhéomètre prototype (Amziane et al., 2007 ; Estellé et al., 2007).

Pour étudier la rhéométrie des bétons, nous avons conçu un appareil équipé d'une géométrie vane à 4 pales (voir figure 1) de façon à s'affranchir des problèmes de

glissement à la paroi de l'outil et pour éviter une déstructuration trop importante du matériau avant la réalisation de l'essai. La géométrie utilisée est caractérisée par une hauteur h de 15 cm et un diamètre D de 15,65 cm. Le béton est placé dans un container cylindrique (35 cm de diamètre) dont la paroi interne est pourvue d'une rugosité adaptée à la taille des grains (de l'ordre du cm). Le capteur de couple présente une capacité de 100 Nm et la vitesse de rotation de l'outil peut atteindre 120 t/min maximum, la vitesse de rotation du moteur (4000 tr/min maximum) étant modifiée par un réducteur. Un capteur de vitesse de rotation mesure également la vitesse vraie de l'outil. L'échantillon placé dans son container est levé à l'aide d'une table élévatrice jusqu'à immersion de l'outil et affleurement à la surface. Le moteur du rhéomètre est piloté par ordinateur. Un logiciel associé permet de générer et lancer le protocole expérimental. L'acquisition des données, vitesse vraie de rotation de l'outil Ω et couple M , est instantanée.

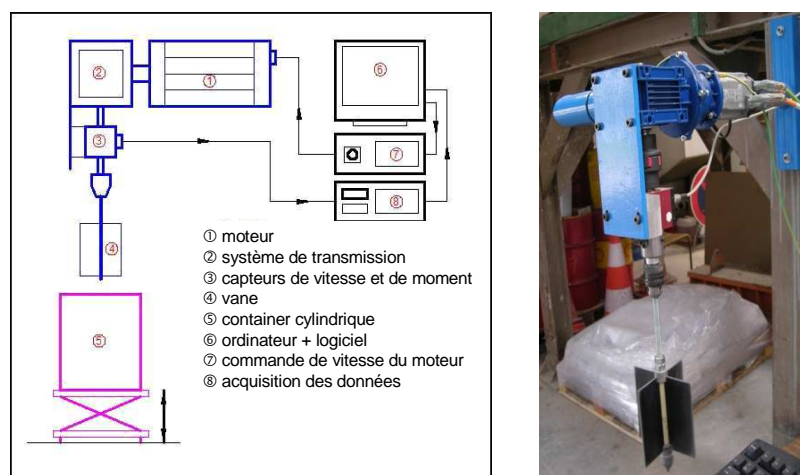


Figure 3. Schéma de principe du dispositif expérimental et du rhéomètre à béton.

Le protocole utilisé est le suivant. On impose à l'outil une vitesse de rotation de 1 tr/min pendant 20s, puis la vitesse de rotation augmente linéairement pendant 100s jusqu'à 45 tr/min. Cette vitesse est maintenue pendant 20s, puis décroît linéairement jusqu'à 0 en 100s. La première partie de l'essai est destinée à déterminer le seuil statique des bétons (seuil de mise en écoulement après repos). Dans ce cas, la contrainte de cisaillement est déterminée par l'équation [8] (Nguyen et Boger, 1985), le seuil statique de mise en écoulement correspondant à la valeur maximale de contrainte dans cette partie.

$$\tau = \frac{2M}{\pi D^3} \left(\frac{h}{D} + \frac{1}{6} \right)^{-1} \quad [8]$$

La partie rampe croissante/décroissante doit permettre d'évaluer leur comportement sous cisaillement. Dans ce cas, la procédure décrite dans la section 2.1.1 permet de tracer la courbe d'écoulement à partir des données expérimentales et de la géométrie d'essai. Si cette courbe peut être globalement considérée comme linéaire, nous pouvons évaluer une viscosité plastique et un seuil dynamique (seuil extrapolé à cisaillement nul). Ce seuil dynamique peut être différent du seuil statique mesuré en début d'essai. Le seuil à l'arrêt est aussi mesuré et peut être inférieur au seuil statique

En parallèle, des essais traditionnels d'étalement ou d'affaissement, essais de caractérisation rhéologique empiriques, sont réalisés sur chaque composition. Les seuils de cisaillement sont identifiés à l'aide de ces essais selon la procédure donnée par Roussel et Coussot (2005, 2006a).

3.2 Bétons étudiés

Trois types de bétons sont étudiés. Ces bétons sont utilisés dans un contexte industriel pour réaliser des éléments constructifs destinés au bâtiment. Leur composition a été finalisée afin d'assurer une mise en forme optimale du béton frais (par moulage) et de respecter les impératifs en terme de comportement mécanique du béton durci à différentes échéances. On distingue ainsi trois bétons industriels nommés ici béton de poutrelle, béton auto-plaçant, béton de prédalle. Le béton de poutrelle est destiné à une mise en forme par moulage sous vibration. Ce béton subit un démoulage rapide (environ 30 minutes) en frais. Le béton auto-plaçant doit remplir le moule sans assistance de vibration. Il est donc très fluide et présente un seuil de cisaillement bas. Le béton de prédalle est un béton traditionnel moulé en faible épaisseur. Le démoulage est réalisé après durcissement du béton. Les compositions des bétons ne sont pas indiquées ici (données relevant de la confidentialité) mais elles sont conformes aux dosages habituels. La concentration en ciment est voisine de 350 kg/m^3 de béton frais, le dosage en eau est tel que la fraction volumique solide de la suspension reste voisine de 0,85. Le recours à différents adjuvants fluidifiants permet de garantir les propriétés rhéologiques recherchées.

Les propriétés rhéologiques des bétons sont étudiées sur une série de gâchées réalisées sur une période de 4h et correspondant au remplissage d'une série de moules (4 à 8 gâchées selon le béton étudié). Chaque gâchée est réalisée à l'aide d'un malaxeur industriel de $1,25 \text{ m}^3$. L'opérateur pilotant le malaxeur respecte une fiche de formulation. Il peut, si nécessaire, corriger certains paramètres de mélanges, typiquement le dosage en eau de façon à intégrer les aléas d'introduction d'eau par les constituants solides, sables et graviers, qui peuvent avoir été laissés exposés aux intempéries. Ces corrections ne doivent cependant pas compromettre les propriétés recherchées (moulage et résistance).

L'échantillon de béton est prélevé sur la chaîne, sur le lieu de remplissage des moules. L'étude rhéologique est lancée 5 minutes après réception du béton.

3.3 Résultats expérimentaux

La fermeté des bétons de poutrelle et de prédalle permet de réaliser des essais d'affaissement au cône d'abrams et d'obtenir une mesure d'affaissement. Les travaux numériques de Roussel (2006b) permettent d'évaluer l'évolution de la hauteur d'affaissement en fonction du seuil statique du matériau. Ici, la mesure de seuil statique obtenue par le rhéomètre et la mesure d'affaissement permettent de comparer les points expérimentaux avec les résultats de Roussel (2006b). Comme le montre la figure 4, on constate un bon accord entre les données numériques et expérimentales. Les mesures d'affaissement sont donc caractéristiques du seuil statique et non du seuil dynamique des bétons. Ceci justifie donc la différence entre le seuil évalué à partir des résultats présentés sur la figure 2 dans le cas des essais comparatifs (seuil dynamique) et le seuil évalué par l'affaissement.

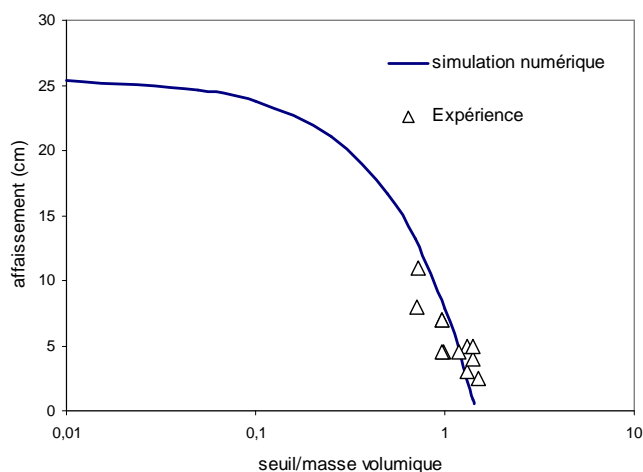


Figure 4. Comparaison entre l'affaissement et le seuil statique des bétons de poutrelle et prédalle estimé selon l'équation (8).

La figure 5 décrit les résultats obtenus pour les bétons de poutrelles en exploitant les mesures obtenues avec le rhéomètre et en appliquant les équations (2) et (3). On note sur ces courbes que la déstructuration est lente durant le cisaillement. La présence d'une thixotropie élevée nécessaire au procédé de démoulage rapide est logique. Les courbes d'écoulement identifiées sur les branches de vitesse de cisaillement décroissante sont relativement linéaires, ce qui permet de proposer un modèle rhéologique de type Bingham pour ces bétons en cisaillement entretenu. Les seuils statiques au démarrage de l'essai varient entre 1950 et 2670 Pa. Ils sont, en moyenne, 4 fois plus élevés que les seuils dynamiques, estimés en callant un modèle de Bingham sur les courbes d'écoulement, qui eux varient entre 250 et 630 Pa. La viscosité plastique des différents bétons de poutrelles évolue entre 105 et 130 Pa.s. Les valeurs de seuil à l'arrêt sont comprises entre 150 et 550 Pa. Une modification du protocole d'essai induisant un

temps de cisaillement plus long à la vitesse de rotation maximale suivi d'un temps de descente plus court peut conduire à limiter les écarts constatés sur les valeurs précédentes en réduisant les effets liés à la thixotropie pendant la restructuration.

D'après les opérateurs, parmi les bétons testés, le plus ferme et le plus souple correspondent aux limites tolérables vis-à-vis du procédé de moulage. On constate donc que les variations de dosage entre gâchée induisent des variations de grandeurs rhéologiques considérables, ce qui n'était pas évident avant cette étude.

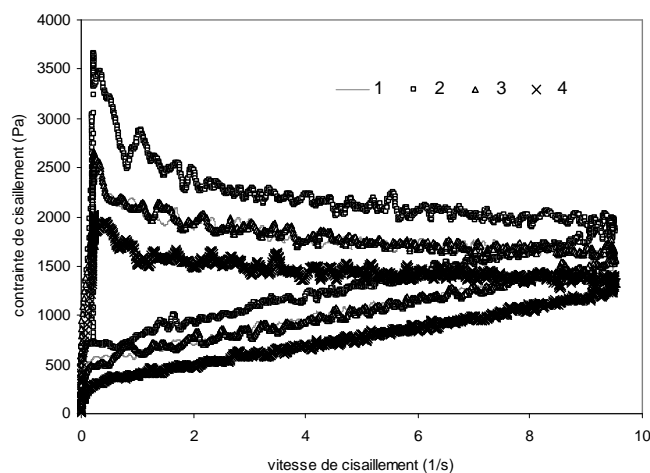


Figure 5. Courbes d'écoulement des bétons de poutrelle – Evolution du comportement rhéologique sous cisaillement et comparaison des gâchées.

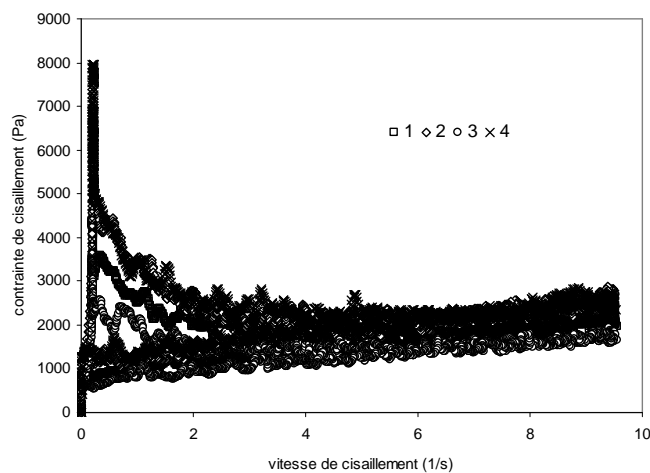


Figure 6. Courbes d'écoulement des bétons de prédalle – Evolution du comportement rhéologique sous cisaillement et comparaison des gâchées.

La figure 6 décrit les résultats obtenus pour les bétons de prédalle. La thixotropie est beaucoup moins marquée pour ces bétons qui présentent également une régularité de production plus affirmée. Les courbes d'écoulement présentent une viscosité plastique légèrement supérieure à celle estimée pour le béton de poutrelles (valeurs comprises entre 120 et 170 Pa.s). Par contre, les seuils dynamiques (compris entre 650 et 1250 Pa) sont doubles. Les valeurs de seuil d'écoulement à l'arrêt varient entre 550 et 1250 Pa. Le comportement est donc assimilable à un comportement plus proche d'un comportement plastique parfait.

La figure 7 présente les résultats obtenus pour les gâchées de béton auto-plaçant. La reproductibilité est plus satisfaisante, mais les essais permettent de montrer une différence de comportement entre les gâchées, comme évaluée dans une étude précédente (Estellé et al., 2007). La zone cisailée dans l'entrefer présente, comme dans les cas précédents, un diamètre externe inférieur à celui du container. L'équation (2) reste licite. Contrairement aux bétons précédents, le béton auto-plaçant présente un comportement différent durant la phase de montée en vitesse. D'autre part, une ségrégation de l'échantillon est constatée sur ces bétons après essais. Il conviendrait donc de revoir le protocole expérimental et limiter la durée de l'essai et/ou la vitesse de rotation de l'outil. Les seuils de cisaillement dynamiques sont très faibles, de l'ordre de 40 Pa à 50 Pa. Les valeurs de contraintes au moment de l'arrêt de l'essai varient elles entre 20 et 25 Pa. Ces dernières valeurs sont à comparer aux seuils estimés par mesure d'étalement, comme décrit par Roussel et Coussot (2006a) (diamètre de galette égale à 71 cm ou 72 cm, pour une hauteur de 2 à 2,5 cm au centre), comprise entre 20 Pa et 23 Pa. On peut constater la bonne corrélation entre ces deux valeurs et les seuils à l'arrêt.

Les couples mesurés sont faibles, ce qui induit un rapport signal/bruit plus défavorable pour ce matériau fluide. Les résultats restent cependant tout à fait exploitables.

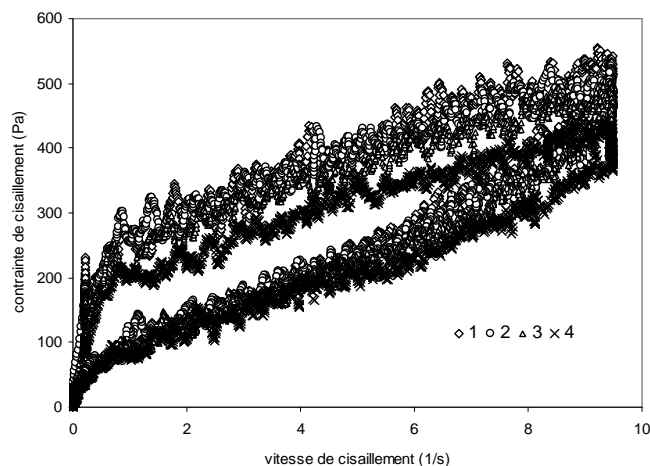


Figure 7. Courbes d'écoulement des bétons auto-plaçants – Evolution du comportement rhéologique sous cisaillement et comparaison des gâchées.

4. Conclusions

L'étude comparative menée dans la première partie a montré que le comportement des bétons peut être difficile à identifier selon le rhéomètre utilisé. Elle démontre également la nécessité de l'utilisation d'une géométrie d'essai adaptée, associée à un protocole de dépouillement des données expérimentales approprié. La procédure proposée de traitement des données permet de construire une courbe caractéristique du comportement du matériau cisailé.

Ensuite, le comportement rhéologique de bétons industriels a été étudié au moyen d'un rhéomètre muni d'une géométrie à ailettes. Les différents essais permettent de mettre en évidence les différences de comportement et de propriétés rhéologiques en fonction de la composition et de l'utilisation des différents bétons. Certains des paramètres identifiés ont été favorablement comparés aux valeurs obtenus par des essais empiriques traditionnels.

Finalement, le rhéomètre développé, associé à sa méthode de dépouillement apparaît comme un outil pertinent et particulièrement adapté au développement de nouvelles formulations sur la base de critères rhéologiques ainsi qu'au contrôle de qualité.

Bibliographie

- Amziane, S., Lecompte, T., Tchamba J-C., Lanos, C., Developement of a concrete rheometer fitted with hydraulic pressure transducers, 5th Int. RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (SCC 2007), Gent , 3-5 septembre (2007).
- Beaupré, D. : Rheology of High Performance Shotcrete, Ph D. Thesis Uni. Of British Columbia, Canada (1994).
- Banfill, P.F.G., Beaupré, D., Chapdelaine, F., De Larrard, F., Domone, P., Nachbaur, L., Sedran, T., Wallevik, O., Wallevik, J.E. : Comparison of concrete rheometers: International tests at LCPC Nantes, October 2000, NISTIR 6819, ed. Ferraris C.F., Brower L.E., September (2001).
- Coussot P.: Rhéologie des boues et laves torrentielles – Etudes de dispersions et suspensions concentrées, Thèse de doctorat INP Grenoble et étude du CEMAGREF, Série Montagne n°5 (1993).
- De Larrard, F., Szitkar, J.C., Hu, C., Joly, M. : Design of a rheometer for fluid concretes, RILEM Workshop Special Concretes Workability and Mixing 201-208 (1993).
- De Larrard, F., Sedran, T., Hu, C., Szitkar, J.C., Joly, M., Derkx, F. : Evolution of the workability of Superplasticized Concretes: assessment with BTRHEOM rheometer, Rilem International Conference on Production Methods and Workability of Concrete, RILEM Proceedings 32, Glasgow Scotland, June 3-5, 377-388 (1996).
- Domone, P.L.J., Xu, Y., Banfill P.F.G.: Developments of the two-point workability test for high-performance concrete, Magazine of Concrete Research 51 181-190 (1999).

- Estellé P., Perrot A., Mélinge Y., Lanos C., Amziane S.: Rheological characterization of self compacting concrete from vane shear flow measurement, 5th Int. RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete (SCC 2007), Gent , 3-5 septembre (2007).
- Estellé P., Lanos C., Perrot A. : Processing the Couette viscometry data using a Bingham approximation in shear rate calculation. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mech.*, 154, 31-38 (2008a)
- Estellé P., Lanos C., Perrot A., Amziane S.: Processing the vane shear flow data from Couette analogy. *Applied Rheology* vol 18:3 (2008b) 34-37.
- Estellé P., Lanos C., Shear flow curve in mixing systems – a simplified approach, *Chemical Engineering Science*, 63, 5887-5890 (2008c)
- Ferraris, C. and Brower, L., eds. : Comparison of Concrete Rheometers: International Tests at MBT (Cleveland OH, USA) in May 2003, National Institute of Standards and Technology NISTIR 7154, (Septembre 2004).
- Koehler, E. P. : Development of a Portable Rheometer for Portland Cement Concrete, MS Thesis, The University of Texas at Austin, Austin, (2004).
- Koehler, E. P., Fowler, D. W., Ferraris, C. F., Amziane, S.: A New Portable Rheometer for Fresh Self-Consolidating Concrete, Proc. of session ACI 2005, New York (2005).
- Lanos C., Estellé P.: Rhéométrie sur bétons frais, 42ème colloque du GFR, Clermont-Ferrand, 10-12 octobre (2007).
- Nguyen Q.D., Boger D.V., Direct yield stress measurement with the vane method, *J. Rheology* 29(3) 335-347 (1985).
- Roussel, N., Coussot, P.: Fifty-cent rheometer for yield stress measurements: From slump to spreading flow, *Journal of Rheology*, 49(3) (2005) 705-718.
- Roussel, N., Coussot, P., Ecoulement d'affaissement et d'étalement : modélisation, analyse et limites pratiques, *Revue Européenne de Génie Civil*, vol. 10, n°1, 25-44 (2006a).
- Roussel N., Correlation between yield stress and slump: comparison between numerical simulations and concrete rheometers results, *Materials and structures* 39:501-509 (2006b).
- Wallevik, O.H. : The rheology of fresh concrete and its application on concrete with and without silica fume, Dr. ing. Thesis 1990:45, NTH Trondheim, p. 185, Norway (1990).
- Wallevik, O.H., Gjørsv, O.E. : Development of a coaxial cylinder viscometer for fresh concrete. Properties of fresh concrete, Proceedings of the Rilem Colloquium, Chapman & Hall, Hanover, 213-214, October (1990).