

INFLUENCE DE LA RHEOLOGIE DES BETONS RENFORCES DE FIBRES METALLIQUES SUR LEURS PROPRIETES MECANQUES

Bensaid Boulekbache¹, Mostefa Hamrat², Mohamed Chemrouk³, Sofiane Amziane⁴

T. 2. Performance of materials

RESUME

Ce papier présente les résultats d'une étude expérimentale sur l'influence de la rhéologie sur l'orientation des fibres métalliques et par suite sur le comportement en flexion et compression des bétons de fibres. Plus précisément, on étudie l'influence de l'orientation d'un volume de 0.5 % de fibres sur les propriétés mécaniques d'un béton ordinaire fluide, d'un béton autoplaçant (seuil de cisaillement faible < 50 Pa) et d'un béton à hautes performances plastiques (seuil de cisaillement élevé >100 Pa).

Les résultats montrent que la fluidité du béton suivi des effets de parois sont des paramètres essentiels de l'orientation et de la distribution des fibres. Dès lors que l'on obtient une orientation dans le sens de l'efficacité mécanique, un comportement en flexion nettement amélioré est observé y compris pour un béton ordinaire. En revanche, nous avons pu observer dans le cas d'un béton à hautes performances qu'une mauvaise orientation des fibres annule leurs contributions en flexion (ductilité). La résistance à la compression n'étant pas affectée.

MOTS-CLES :

Fibre, Rhéologie, Distribution, Orientation, Ductilité.

¹ Département Génie Civil, Université de Chlef, Algérie, bboulekbache@yahoo.fr

² Département Génie Civil, Université de Chlef, Algérie, mhamrat@yahoo.fr

³ Université des Sciences et Technologie Houari Boumediene, Alger, Algérie, mchemrouk@yahoo.fr

⁴ LAMI, Polytech'Clermont, Université Blaise Pascal, Aubière, France,

sofiane.amziane@polytech.univ-bpclermont.fr

1. INTRODUCTION

L'objectif de rendre le béton plus résistant en flexion et en traction suscite encore l'attention de nombreuses recherches. Une des voies explorées dans les années 1980/90 a été de travailler sur l'accroissement de la résistance à la compression du béton. Cependant, la notion d'une résistance en traction faible en comparaison de celle en compression est maintenue pour le BHP (Béton à hautes Performances) et avec l'augmentation de la résistance à la compression, le BHP devient fragile.

La piste la plus évoquée dans la littérature pour pallier cette faiblesse de comportement en traction consiste en l'ajout de fibres métalliques dans la formulation du béton. Ces dernières jouent un rôle de renforcement qui compense la fragilité du béton par couture de la microfissuration et la macrofissuration. Les fibres ont la capacité ainsi de contrôler l'ouverture des fissures, jouant le rôle d'absorbants d'énergie [Rossi 1994]. Elles ont de plus, la capacité de transférer les charges, par leur résistance en traction, dès lors qu'une bonne adhérence fibre/matrice est assurée.

Pour autant, l'efficacité de la fibre passe par une maîtrise de son orientation. La connaissance précise de l'orientation des fibres serait un facteur qui assurerait le bon dimensionnement des structures, permettant ainsi l'optimisation de la quantité de fibre à prévoir dans la formulation. Sur ce point, le dimensionnement des bétons renforcés de fibres se fonde sur l'hypothèse d'une répartition des fibres aléatoire en orientation et homogène dans la masse [Dupont et Vandewalle 2005].

Actuellement, on trouve dans la littérature des méthodes efficaces pour la caractérisation de l'orientation des fibres dans le béton à posteriori, c'est-à-dire après durcissement du béton. Des résultats ont été acquis par l'utilisation de la technique de rayons X couplée à une analyse d'image [Ferrara et Meda 2006], ou par mesures de résistivités électriques [Lataste *et al.* 2007]. De notre point de vue, les paramètres, rhéologie du matériau en écoulement, notamment le seuil de cisaillement et l'effet de paroi généré par la géométrie du coffrage, sont ceux auxquels l'orientation des fibres est la plus sensible.

Concernant sa rhéologie, le béton est classé dans la famille des fluides non Newtoniens. C'est une suspension de granulats en forte concentration. Le plus souvent, on distingue la phase pâte constituée de ciment, d'eau et de fluidifiant, de la phase inerte granulaire composée de sable et gravier. L'ouvrabilité d'un béton est définie comme étant "une caractéristique qui détermine la facilité d'un béton ou d'un mortier dont le malaxage, la mise en place, la consolidation et la finition se sont déroulés dans des conditions homogènes". En condition de chantier, l'outil de caractérisation de l'ouvrabilité le plus courant dans le monde est le cône d'Abrams utilisé.

Pour se rendre à l'évidence de l'intérêt de la mesure du seuil du béton qui suffit à caractériser sa fluidité, une étude a été réalisée par Roussel [Roussel 2007] sur l'influence du seuil sur la planéité après coulage du béton dans un coffrage ferrailé. L'auteur montre que si le béton a un comportement de fluide purement visqueux, à très faible seuil de contrainte, la forme finale du béton est plane alors que pour un béton qui a un seuil élevé, le béton ne coule pas de façon homogène dans l'ensemble du coffrage et la forme finale n'est pas plane. Par ailleurs, le seuil d'écoulement est aussi le seul paramètre rhéologique qui peut être corrélé aux grandeurs mesurées par différents types d'essais rhéologiques pour une large gamme de consistance de bétons. La viscosité étant liée à la vitesse ou au temps d'écoulement.

Le facteur d'orientation des fibres reste cependant difficile à prédire dans le cas du béton. C'est précisément ce dernier point auquel nous nous intéressons. Il fait l'objet dans la suite de la présentation d'une campagne d'expérimentation introduite d'abord par une évaluation qualitative de l'orientation de fibres métalliques rigides dans un fluide à seuil modèle, selon des conditions de coffrages et de fluidité de suspension usuelles. On translate ensuite nos observations qualitatives dans le cas d'un béton de fibres durci. Dans ce cas, il nous a été possible de caractériser quantitativement

l'orientation de la fibre après l'essai de flexion. On analyse enfin, l'effet mécanique de ce facteur d'orientation sur la résistance en compression, en flexion, la ductilité et la localisation de fissure.

2. EXPERIMENTATION

2.1. Caractérisation de l'orientation des fibres dans un fluide à seuil modèle

La visualisation du positionnement des fibres dans un fluide à seuil au comportement rhéologique comparable à celui du béton est l'idée directrice développée. Nous nous sommes tournés vers l'utilisation d'un fluide à base de Carbopol 940. Il s'agit d'un polymère à chaînes longues fréquemment utilisé dans l'industrie pharmaceutique et la cosmétique (gel pour les cheveux entre autre). Ce fluide a été utilisé dans la caractérisation de l'écoulement des bétons dans un coffrage [Nguyen *et al.* 2007].

La fabrication des suspensions de Carbopol comprend deux étapes : la dispersion des poudres de polymère puis la neutralisation de la solution obtenue. La deuxième phase est celle de l'épaississement du fluide devenant gel. La poudre de Carbopol a été incorporée progressivement dans l'eau distillée sous agitation pour assurer une bonne dispersion et un mouillage complet des particules de polymère. La solution obtenue a été ensuite neutralisée par la soude NaOH en prenant grand soin de faire disparaître les bulles d'air, les produits ont été laissés au repos pendant 2 jours. Les suspensions de Carbopol utilisées dans cette étude ne présentent ni de caractère thixotrope ni d'évolution irréversible. Les suspensions étudiées ont des seuils d'écoulement compris entre 12 et 90 Pa. On ne présente ici que les résultats pour des concentrations de 0.15 % et 0.3 % (Tableau 1).

Tableau 1. Contrainte seuil des solutions de Carbopol

Concentration en Carbopol 940	0.15 %	0.30 %
Contrainte seuil (Pa)	25	70

Nous ajoutons à la solution de Carbopol des fibres métalliques à crochets, de longueur 35 mm et d'élanement 65 selon un dosage de 0.5 %. L'ensemble est fortement agité afin d'assurer une distribution aléatoire et homogène des fibres dans la solution. Nous effectuons alors une mise en écoulement de fluide fibré par l'intermédiaire d'un entonnoir (écoulement fontaine). Deux types d'écoulement sont ensuite étudiés :

- Radial à surface libre (Figs 1 et 2)
- Canal. Le fluide est dans cette configuration confiné par deux parois linéiques (Figs 3 et 4).

Pour l'écoulement radial à surface libre, les observations montrent que l'orientation des fibres se fait en majorité perpendiculairement au sens de l'écoulement et une répartition plus homogène dans le cas où le seuil est de 25 Pa (Fig. 1). Ce seuil permet aussi d'éviter la formation d'amas fibreux observée dans la configuration d'un seuil de 70 Pa.

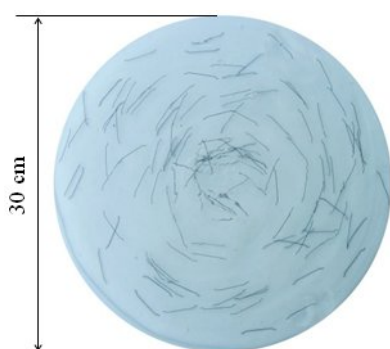


Figure 1. Ecoulement radial à surface libre d'une solution de Carbopol fibrée ($\tau_0 = 25$ Pa)

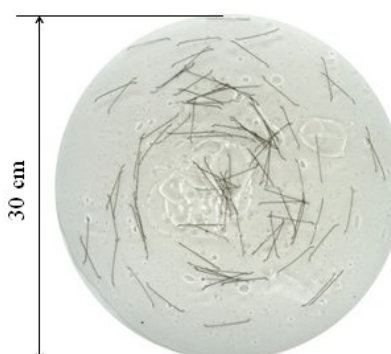


Figure 2. Ecoulement radial à surface libre d'une solution de Carbopol fibrée ($\tau_0 = 70$ Pa)

Dans le cas d'un écoulement canal, l'orientation des fibres perpendiculaire au sens de l'écoulement est perturbée par l'effet de parois (Fig. 3). L'effet paroi est sensible à la largeur du canal, la réorientation

dans le sens longitudinal s'amplifie plus la largeur de canal tend vers la taille de la fibre. Pour un seuil de cisaillement de 70 Pa, l'orientation des fibres est plus aléatoire s'accompagnant de la formation d'amas fibreux (effet d'oursins) près du centre de l'écoulement (Fig. 4). A noter que la mise en place de la vibration permet de forcer l'écoulement du fluide et ainsi de remettre les fibres en rotation.



Figure 3. Ecoulement canal d'une solution de Carbopol fibrée ($\tau_0 = 27$ Pa)



Figure 4. Ecoulement canal d'une solution de Carbopol fibrée ($\tau_0 = 70$ Pa)

Une illustration de nos observations est présentée dans la Fig. 5. Le profil de vitesse affecte l'orientation de la fibre induisant sa rotation pour se positionner perpendiculairement à la direction de l'écoulement. Plus le seuil du fluide porteur sera faible (moins de 50 Pa), plus la vitesse d'écoulement s'accroîtra entraînant une amplification du phénomène. Au contraire pour des seuils relativement élevés (de l'ordre de 100 Pa), la vitesse d'écoulement sera faible voire insuffisante pour créer les conditions d'une orientation et d'un désenchevêtrement des fibres.

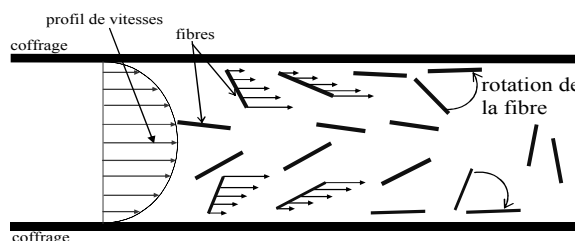


Figure 5. Illustration de l'écoulement radial et effet de paroi en écoulement canal

Au final, cette expérience de visualisation du positionnement des fibres métalliques rigides et dosées en faible concentration, dans un fluide à seuil, permet d'observer une orientation préférentielle guidée par les lignes d'écoulement du fluide porteur.

2.2. Application au béton

L'application pratique de nos observations sur l'orientation et la distribution des fibres dans un fluide modèle est à présent réalisée sur un béton. L'avantage est la possibilité de quantifier l'orientation par le biais d'un comptage manuel des fibres sur une section rompue obtenue à l'issue des essais de flexion.

Le ciment utilisé est de type CEM I 52.5 N avec une finesse Blaine de 3520 cm^2/g . Le fluidifiant vient de la famille des polycarboxylates modifiés. Les fibres d'acier DRAMIX sont commercialisées par la société Bekaert ; elles sont munies de crochets à ses extrémités avec un diamètre de 0.75 mm et une longueur de 60 mm et dosées à 40 kg/m^3 . Trois types de bétons fibrés sont formulés (tableau 2).

Les bétons sont confectionnés dans un malaxeur traditionnel d'une capacité de 100 litres. Pour éviter la formation d'amas fibreux, les fibres sont introduites petit à petit après homogénéisation complète du béton. Les éprouvettes destinées aux essais sont des cylindres 11x22 cm et des poutres 15x15x70 cm. Elles sont remplies en deux couches successives et soumises à une vibration externe sauf en ce qui concerne le béton autoplaçant. Quarante-huit heures plus tard, elles sont démoulées et surfacées aux deux extrémités avec un disque diamanté pour minimiser les défauts de parallélisme entre les deux faces. Par la suite, les éprouvettes sont conservées dans une salle dotée d'une climatisation qui assure une température de $20 \pm 1^\circ \text{C}$ et une hygrométrie relative de $50 \pm 5\%$.

Ces bétons se différencient par leur résistance en compression à 28 jours de la matrice une fois durci ($f_{c28(BO)} = 29$ MPa ; $f_{c28(BAP)} = 61$ MPa et $f_{c28(BHP)} = 80$ MPa) et par la fluidité (BAP très fluide, BO fluide et BHP plastique). Le seuil de cisaillement est mesuré à l'aide d'un rhéomètre dont la géométrie de l'outil cisailant "vane" est conçue pour le béton. Le seuil de cisaillement des bétons est déterminé en réalisant des tests rhéologiques suivant la procédure et l'analyse décrite par [Estellé *et al.*, 2008]. La géométrie de l'outil "vane" adaptée au béton comprends 4 pales de 10 mm d'épaisseur montées sur un arbre cylindrique de 10mm de diamètre. La hauteur de pale est de 60 mm tandis que le diamètre total de l'outil "vane" est de 250 mm. Le gap entre l'outil cisailant et le container est de 90 mm évitant ainsi les problèmes d'effet d'échelle induit par la taille des granulats ($D_{max} = 10$ mm). Les bétons fibrés ne sont pas testés à cause de la taille des fibres dont la longueur importante (60 mm) est justement incompatible avec le gap de 90 mm. Un coefficient d'orientation α proposé par [Soroushian et Lee 1990] est calculé suivant l'équation (2) :

$$\alpha = N \frac{A_f}{V_f A_b} \quad (2)$$

N : nombre des fibres traversant une section droite, A_b : Section transversale du béton,
 A_f : Section de la fibre, V_f : Dosage volumique des fibres.

Dans le cas du BAPF ($\tau_{0(BAPF)} = 36$ Pa) et BOF ($\tau_{0(BOF)} = 45$ Pa), les fibres ont une orientation préférentielle dans le sens longitudinal ($\alpha_{BAPF} = 0,66$ et $\alpha_{BOF} = 0,60$), à l'inverse du BHPF dont la contrainte seuil est de ($\tau_{0(BHPF)} = 120$ Pa) et $\alpha_{BHPF} = 0,35$ (tableau 2). Les fibres sont dans ce cas regroupées en amas et mal dispersées dans la section du béton, ce qui confirme les observations de relation forte, entre rhéologie et orientation/distribution, mise en évidence sur le fluide modèle.

Tableau 2. Caractéristiques des bétons frais

	<i>BO</i>	<i>BOF</i>	<i>BHP</i>	<i>BHPF</i>	<i>BAP</i>	<i>BAPF</i>
Affaissement/Etalement (cm)	24	21	16	6	70	65
Facteur d'orientation α	/	0,60	/	0,35	/	0,66
Contrainte seuil (Pa)	45	/	120	/	36	/

3. INFLUENCE DE L'ORIENTATION DES FIBRES SUR LE COMPORTEMENT EN COMPRESSION ET EN FLEXION

3.1 Comportement en compression

Les essais de compression sont exécutés selon la norme (NF EN 12390-3) sur trois cylindres (11x22cm). La présence des fibres réduit légèrement la résistance à la compression [Paillière 1993, Rossi 1994] ou tout au plus ne l'influence pas. Les fibres ont réduit la résistance à la compression de 7 %, 6 % et 5 % pour le BOF, BAPF et BHPF respectivement. En fait, les fibres travaillent efficacement quand elles sont soumises à la traction. Elles empêchent ainsi la propagation des fissures. Lors de l'écrasement sous compression, ce rôle est très réduit voir inexistant en phase de pré fissuration, induisant même des défauts supplémentaires dans la matrice pouvant conduire à une faible compacité. Le comportement pré-pic est de ce fait logiquement quasi identique avec ou sans fibres. En revanche, la présence des fibres améliore le comportement post-pic et réduit la pente descendante de la courbe contrainte-déformation (Fig. 6). Cette observation est particulièrement spectaculaire lorsqu'il s'agit du BHP fibré.

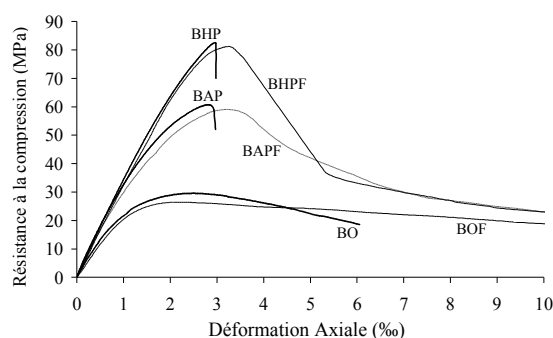


Figure 6. Effet des fibres sur le comportement en compression selon le type de béton

3.2. Comportement en flexion

L'essai consiste à rompre en flexion quatre points des éprouvettes prismatiques 15x15x70 cm. Le déplacement est contrôlé à une vitesse de 0,004 mm/s (Fig. 10).

Le BHP testé a eu logiquement la résistance la plus importante (tableau 3). Elle est 17,5 % plus élevée que celle du BAP et 13,31 % plus élevée que celle du BO. Dans la configuration fibrée, le rôle de la fibre est actionné si elle est orientée dans le sens de la traction. Cette efficacité est plus importante pour les bétons à hautes performances, grâce à une bonne adhérence du couple fibre-matrice. On remarque cependant que l'effet de la rhéologie, notamment le seuil de cisaillement, est fondamental. Concernant les bétons fluides, la répartition des fibres observée est homogène et de plus les fibres sont orientées dans le sens de l'effort de traction induite par la flexion (Fig. 7). En revanche, dans les bétons plastiques (seuil de cisaillement élevé), on remarque une orientation aléatoire et un détachement partiel des fibres pré-collées en plaquettes (Fig. 8).

Au final, seule l'orientation de la fibre et donc la rhéologie a influencé de manière très significative la résistance à la flexion des poutres. Quantitativement, on observe en comparaison des bétons non fibrés un accroissement de résistance en flexion de 60 %, 66 % et 114 % respectivement pour les BOF, BHPF et BAPF.

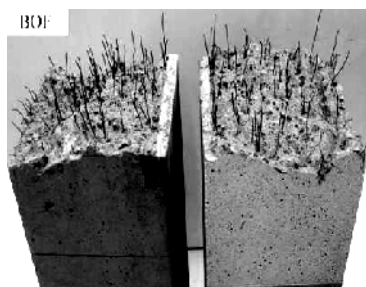


Figure 7. Distribution et orientation des fibres à travers la section de rupture pour BOF

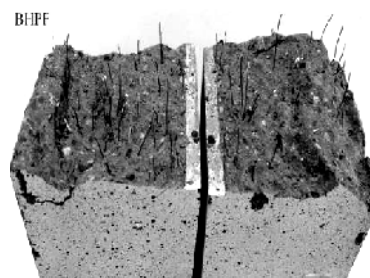


Figure 8. Distribution et orientation des fibres à travers la section de rupture pour BHPF

Le comportement post-pic des bétons fibrés reste cependant ductile quel que soit le type de béton fibré (Fig. 10). Pour pouvoir comparer les énergies absorbées, des indices de ductilité I_5 , I_{10} , I_{20} , I_{30} , I_{50} , I_{100} représentent les énergies consommées pour différentes valeurs de flèches ont été calculés d'après ASTM C 1018, ils sont entachés de l'erreur commise dans la détection de la première fissure. Dans notre étude, l'utilisation du système de mesure de champs cinématique utilisant l'analyse d'images obtenues par une caméra numérique, nous a permis de détecter avec précision l'apparition de la première fissure (Fig. 9) et par la suite éliminer l'erreur commise dans le calcul des indices de ductilité. Les efforts enregistrés lors de l'apparition de la première fissure, les charges ultimes et les flèches correspondantes sont données dans le Tableau 3. Les données présentées sont à chaque fois une moyenne de trois essais.

Tableau 3. Paramètres de la résistance de flexion

Mélange	Facteur d'orientation α	Flèche à la 1 ^{ère} fissure (mm)	Flèche au pic (mm)	Charge de 1 ^{ère} fissuration (kN)	Charge de Pic (kN)
BOF	0,60	0,110	1,794	17,44	27,98
BAPF	0,66	0,154	3,458	19,08	40,77
BHPF	0,35	0,100	0,794	18,14	33,21

La ductilité a été systématiquement largement supérieure pour les BOF et BAPF (Fig. 11), montrant l'importance de l'orientation de la fibre en comparaison de la résistance du béton. Le BAPF a présenté systématiquement une meilleure ductilité en comparaison de celle du BOF et BHPF (Fig. 10). Ceci montre l'importance de la distribution et de l'orientation des fibres en comparaison de la résistance de la matrice. L'efficacité de la fibre est certes améliorée quand la matrice cimentaire est dense, assurant une meilleure adhérence fibre-matrice, il reste que l'orientation est le paramètre indispensable pour activer le transfert de charge vers la fibre. Ce transfert de charge de fibres en fibres est à l'origine de la multifissuration observée dans le cas des BOF et BAPF (Fig. 12). A l'inverse dans le cas des BHP, une localisation des efforts à mi travée entraîne une localisation de fissuration sans possibilité de transfert, comme observé sur les bétons fluides. En résumé, la contrainte seuil du béton a été le paramètre déterminant de la performance du comportement en flexion.



Figure 9. Dispositif de flexion

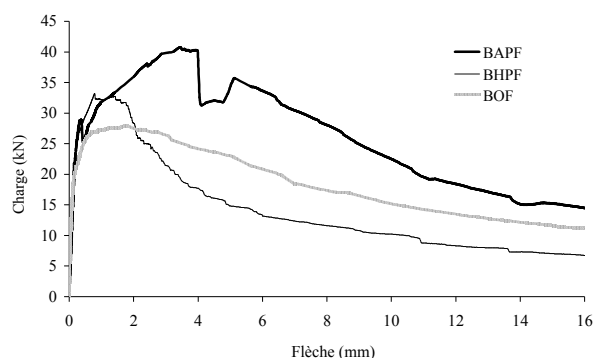


Figure 10. Courbes charge – flèche des bétons fibrés

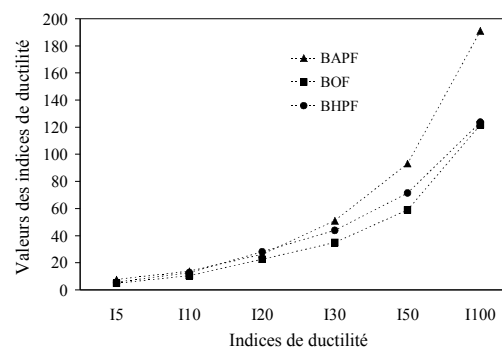


Figure 11. Indices de ductilité des bétons fibrés

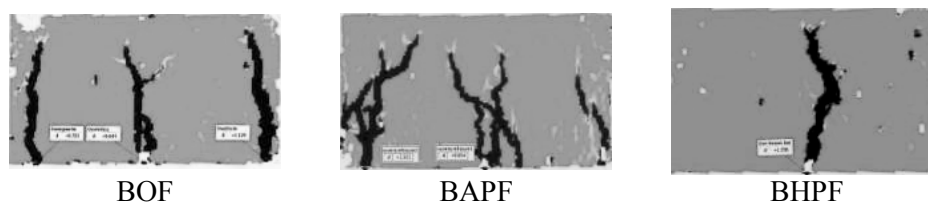


Figure 12. Etat de fissuration pour les bétons fibrés

4. CONCLUSIONS

L'objectif principal de cette étude est d'examiner l'influence de la rhéologie du béton sur l'orientation des fibres et par suite sur les performances des bétons. Les conclusions se résument comme suit :

- Les tests préalables de visualisation de l'orientation des fibres dans un fluide à seuil translucide au comportement rhéologique comparable à celui du béton ont montré une orientation naturelle des fibres dans le sens perpendiculaire à l'écoulement (dalle). L'orientation des fibres est cependant fortement modifiée par la présence de parois (écoulement canal). Les fibres s'alignent alors majoritairement parallèlement à la direction de la paroi.

- Le seuil de cisaillement est la variable rhéologique fondamentale qui détermine l'orientation et l'homogénéité de la distribution des fibres. Un seuil de contrainte faible (< 50 Pa) assure une distribution homogène et une orientation perpendiculaire à l'écoulement, uniquement gênée par la présence de parois. Pour un seuil fort (> 100 Pa), la distribution autant que l'orientation deviennent moins homogènes avec la formation d'amas fibreux.

- L'ouvrabilité du béton est le paramètre qui gouverne l'efficacité de l'adjonction de fibres et par suite la résistance à la flexion et la ductilité du béton de fibres. Les essais présentés ont montré un accroissement relatif de la résistance à la flexion de 22,76 % pour le BAP à faible seuil (= 36 Pa), en comparaison d'un béton à hautes performances BHP à seuil relativement élevé (= 120 Pa). Sans fibres, le BAP testé avait pour autant une résistance en flexion 24 % plus faible que celle du BHP.

- Une distribution homogène des fibres assurée par une faible contrainte seuil induit une ductilité nettement améliorée du béton fibré. Un transfert de charge est assuré dans l'ensemble de l'éprouvette. Une localisation de contrainte très prononcée est observée dans le cas des bétons fermes (BHPF).

5. REFERENCES

Dupont D. & Vandewalle L. 2005, 'Distribution of steel fibres in rectangular sections', *Cement and Concrete Composites*, vol. 27, n° 3, pp. 391-398.

Estellé P., Lanos C., Perrot A. & Amziane S. 2008, 'Processing the vane shear flow data from couette analogy', *Applied Rheology*, vol. 18, n° 3, 34037-1-34037-6.

Ferrara L., Meda A.R., 'Relationships between fibre distribution, workability and the mechanical properties of SFRC applied to precast roof elements', *Materials and Structures*, vol. 39, n° 4, 2006, pp. 411-420.

Latatste J.F., Behloul M. & Breyse D. 2008, 'Characterisation of fibres distribution in a steel fibre reinforced concrete with electrical resistivity measurements', *NDT & E International*, vol. 41, n° 8, pp. 638-647.

Nguyen T., Roussel N., Coussot P. 2007, 'Prédiction de la capacité d'un béton frais à remplir un coffrage', *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, vol. 11, n° 4, pp. 463-475.

Paillere A.M. 1993, 'Le béton de fibres métalliques, Etats actuels des connaissances', *Annales de l'ITBTP, série béton*, vol. 302, n° 515, pp. 39-68.

Rossi P. 1994, 'Steel fiber reinforced concretes (SFRC): An example of french research', *ACI Materials Journal*, vol. 91, n° 3, pp. 273-279.

Roussel N. 2007, 'Rheology of fresh concrete: from measurements to predictions of casting processes', *Materials and Structures*, vol. 40, n° 10, pp. 1001-1012.

Soroushian P. & Lee C.D. 1990, 'Distribution and orientation of fibers in steel fiber reinforced concrete', *ACI Materials Journal*, vol. 87, 5, pp. 433-439.