HAL open science

# COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DES MATERIEUX CIMENTAIRES RENFORCES DE FIBRES FLEXIBLES

Fariza Sultangaliyeva, Hélène Carré, Christian La Borderie

**To cite this version:**

Fariza Sultangaliyeva, Hélène Carré, Christian La Borderie. COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DES MATERIEUX CIMENTAIRES RENFORCES DE FIBRES FLEXIBLES. 19e Edition des Journées scientifiques du Regroupement Francophone pour la Recherche et la Formation sur le Béton (RF)2B, Jul 2018, Anglet, France. hal-02983443

**HAL Id: hal-02983443**

**https://hal.science/hal-02983443v1**

Submitted on 29 Oct 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

19e Edition des Journées scientifiques
du Regroupement Francophone pour la Recherche et la Formation sur le Béton
$(RF)^2B$

SIAME, Anglet, France
12 et 13 juillet 2018

# COMPORTEMENT RHEOLOGIQUE DES MATERIEUX CIMENTAIRES RENFORCES DE FIBRES FLEXIBLES

F.Sultangaliyeva[A], H. Carré[A], C. La Borderie[A], N.Roussel[B]
A Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur Appliquées à la Mécanique et au Génie Electrique- Fédération IPRA, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Anglet, France
B Laboratoire Navier, IFSTTAR, Champs-sur-Marne, France

**RÉSUMÉ :** Les fibres en polypropylène sont connues pour être une mesure préventive efficace contre l'écaillage du béton dû à l'exposition au feu. Un dosage élevé de fibres renforce cette protection mais réduit la maniabilité du béton frais. En raison d'un manque d'études, il est difficile d'identifier le dosage et la géométrie optimale des fibres. Cet article vise à comprendre l'influence des fibres en polypropylène sur la rhéologie des matériaux cimentaires frais. Des essais d'étalement sont effectués afin d'évaluer le seuil d'écoulement des pâtes de ciment contenant des fibres flexibles. Les résultats présentent l'influence du dosage et de la géométrie des fibres sur le seuil d'écoulement des matériaux cimentaires frais. En utilisant un schéma prédictif du seuil d'écoulement des matériaux cimentaires avec des fibres rigides, il est prouvé que la rhéologie des pâtes de ciment avec des fibres flexibles est plus complexe que celle de la pâte avec des fibres rigides.

## 1. INTRODUCTION

De nombreuses études ont été menées par les chercheurs présentant un effet positif des fibres en polypropylène pour une réduction des risques d'écaillage du béton dû au feu (Bilodeau et al., 2004, Shuttleworth, 2001). Un dosage en fibres plus élevé renforce cet effet mais conduit à la perte de maniabilité du béton (Szwabowski et Ponikiewski, 2002). Afin d'atteindre un compromis entre la résistance au feu et la fluidité, l'identification du dosage et de la géométrie optimaux des fibres est une tâche essentielle. L'état actuel des connaissances concernant l'influence des fibres souples sur la rhéologie des matériaux cimentaires frais n'est pas suffisant pour répondre à cette question. Cet article vise à comprendre l'effet des fibres flexibles sur la rhéologie du béton frais. Dans un premier temps, on montrera que la flexion des fibres dépend de la nature du fluide de suspension. Ensuite, on étudiera l'influence du dosage et de la géométrie des fibres sur le seuil d'écoulement de la pâte de ciment. Enfin, en utilisant la prédiction du seuil d'écoulement des matériaux cimentaires à fibres rigides, nous montrerons la complexité de la rhéologie du composite cimentaire renforcé de fibres flexibles.

## 2. SEUIL D'ECOULEMENT DES MATERIAUX CIMENTAIRES AVEC DES INCLUSIONS RIGIDES

L'écoulement des matériaux cimentaires est souvent décrit en utilisant le modèle de Bingham qui permet de déterminer le seuil d'écoulement en utilisant l'équation suivante:

$$\tau = \tau_0 + \dot{\gamma}\mu_0 \quad (1)$$

où $\tau$ est la contrainte totale, $\tau_0$ le seuil d'écoulement, $\dot{\gamma}$ le taux de cisaillement et $\mu_0$ la viscosité. Le seuil d'écoulement est la contrainte minimale appliquée pour générer un écoulement d'un fluide visqueux.

Une approche multiphasique utilisée pour décrire la rhéologie du béton à l'état frais considère que le béton est composé d'une phase continue de fluide de suspension (une pâte de ciment homogène) et d'une phase dispersée (des inclusions telles que le sable, gravier et fibres) (Martinie et al., 2010). En faisant l'extrapolation pour la relation de Krieger-Dougherty pour la viscosité apparente (Krieger et Dougherty, 1959), le seuil d'écoulement du béton est décrit comme une fonction du seuil d'écoulement du fluide de suspension et de la fraction volumique des inclusions (Martinie et al., 2010):

$$\tau_0^c \approx \tau_0^p f\left(\frac{\phi}{\phi_m}\right) \tag{2}$$

où $\tau_0^c$ est le seuil d'écoulement du béton, $\tau_0^p$ le seuil d'écoulement de la pâte de ciment, $\phi$ la fraction volumique des inclusions et $\phi_m$ la compacité dense des inclusions. L'écoulement du béton frais dépend du type d'interactions dominant dans le système. Nous devons donc définir différents scénarios de régimes d'empilement possibles pour les fibres. Une explication complète des diverses façons d'empiler des inclusions sphériques est donnée dans l'article de Martinie et al. (2010). Il est important de préciser ici que la compacité dense est caractérisée par les contacts directs entre les inclusions et qu'elle ne dépend pas de la rhéologie du fluide de suspension. Ces contacts directs varient en fonction de la fraction volumique des inclusions.

## 3. RHEOLOGIE DES MATERIAUX CIMENTAIRES RENFORCES DE FIBRES

### 3.1 Distinction entre les fibres rigides et flexibles

À fort dosage de fibres, les contacts directs entre les fibres provoquent une dissipation importante de l'énergie entraînant une augmentation du seuil d'écoulement et une diminution de l'ouvrabilité du matériau cimentaire frais (Martinie et al., 2010). Comme les contacts dépendent de l'empilement des fibres, il est important de distinguer les fibres flexibles des fibres rigides. Les fibres rigides ont tendance à changer le squelette granulaire car, en raison de leur rigidité, elles peuvent déplacer des granulats relativement gros par rapport à la longueur des fibres et augmenter les vides. Pour comparer, les fibres flexibles ont tendance à fléchir autour des granulats et à occuper les espaces vides entre eux. Afin de distinguer les deux types de fibres, un critère de rigidité des fibres dans les matériaux cimentaires a été développé par Martinie et al. (2010). Elle a identifié un ensemble de paramètres qui influencent la déformation des fibres. La déformation des fibres est alors estimée comme:

$$\frac{f}{L} \cong \frac{\tau_0}{E} R^3 \tag{3}$$

où $f$ est la flèche, $L$ la longueur de la fibre, $\tau_0$ le seuil d'écoulement du matériau cimentaire frais, $E$ le module de Young de la fibre et $R$ le facteur d'aspect de la fibre (le rapport entre la longueur et le diamètre de la fibre). En fonction des propriétés de la fibre et de la nature du fluide de suspension, différentes réponses à la flexion peuvent être obtenues. Par exemple, dans le cas de fibres d'acier ayant un facteur d'aspect de 50 et un module d'Young de 210 GPa dans un béton autoplaçant (seuil d'écoulement d'environ 50 Pa), la déformation est d'environ 0,003 %, alors que pour les fibres avec un facteur d'aspect de 500 et un module d'Young de 190 GPa dans un béton ordinaire (seuil d'écoulement de 1000 Pa), la déformation est d'environ 66 % (Martinie et al.2010).

### 3.2 Compacité dense des fibres rigides

Onl s'intéresse à l'évaluation de la compacité dense des fibres rigides. La compacité dense des fibres, déterminée expérimentalement et présentée dans l'article de Martinie et al. (2010), a été évaluée à partir des mesures du volume apparent occupé par les fibres avant la vibration (Ω avant) et après la vibration (Ω après) d'une masse connue de fibres. En utilisant l'approche de Philipse (1996) pour les corps longs avec une gamme de facteur d'aspect entre 50 et 100, une relation entre la compacité dense $\phi_m$ et le facteur d'aspect $R$ pour les fibres rigides a été déterminée comme suit:

$$\phi_m = \frac{4}{R} \tag{4}$$

Dans le cas de fibres rigides, il est possible de mesurer une compacité dense puisque leur flexion dans l'air est comparable à la flexion dans la pâte de ciment (moins de 1%). Au contraire, dans le cas des fibres flexibles, la valeur de la compacité dense est impossible à mesurer directement du fait que leur flexion dépend du fluide de suspension. Ceci rend impossible l'application d'une relation telle que celle de l'équation 4 pour le cas des fibres souples.

### 3.3 Prédiction du seuil d'écoulement

Martinie et al. (2010) a expliqué que le seuil d'écoulement du matériau cimentaire renforcé de fibres rigides peut être prédit en fonction de la fraction d'empilement relative des fibres. Le seuil d'écoulement évolue donc en fonction de $\boldsymbol{\phi/\phi_m}$ égal à $\boldsymbol{\phi R/4}$ en utilisant l'équation 4. Cela signifie que pour la prédiction du seuil d'écoulement d'un matériau cimentaire avec de fibres rigides, deux paramètres sont suffisants: la fraction volumique de la fibre $\boldsymbol{\phi}$ et le facteur d'aspect $\boldsymbol{R}$.

Pour fibres flexibles, nous avons déterminé qu'il est impossible de mesurer la fraction d'empilement dense. Néanmoins, on peut vérifier si l'évolution du seuil d'écoulement du matériau cimentaire avec des fibres flexibles pourrait être décrite en utilisant le même principe que pour fibres rigides.

## 4. RHEOLOGIE DES MATERIAUX CIMENTAIRES AVEC DES FIBRES FLEXIBLES

### 4.1 Matériaux et protocole expérimental

Toutes les pâtes de ciment ont été préparées en utilisant du ciment CEM I 52,5 N Brest de Lafarge. Dans la première partie, on s'intéresse à l'étude de l'influence de la nature de la pâte de ciment sur le seuil d'écoulement. On prépare trois pâtes avec des E/C différents donnés dans le Tableau 1. On utilise une géométrie unique de fibres pour ces essais : L = 12 mm, D = 34 µm et on fait varier le dosage en fibres entre 0% et 3% vol. de la pâte de ciment.

Dans la deuxième étape, on choisit un type de pâte de ciment et on étudie l'influence du dosage et de la géométrie des fibres. Notre pâte de ciment de référence a un E/C = 0.5. Elle est testée en utilisant neuf géométries différentes de fibres à différents dosages de fibres (0%, 0.5%, 1%, 1.5%, 2%, 2.5% et 3% vol. de la pâte de ciment). Les géométries de fibres testées sont présentées dans le Tableau 2.

Tableau 1 : Compositions des mélanges (g)

| Matériau | e/c=0.43 | e/c=0.45 | e/c=0.5 |
|---|---|---|---|
| Ciment | 669 | 651 | 612 |
| Eau | 288 | 293 | 306 |

Tableau 2 : Géométries de fibres

| Facteur d'aspect, R | Longueur , L (mm) | Diamètre, D (µm) |
|---|---|---|
| 176 | 6 | 34 |
| 188 | 6 | 32 |
| 300 | 6 | 20 |
| 333 | 6 | 18 |
| 353 | 12 | 34 |
| 400 | 6 | 15 |
| 529 | 18 | 34 |
| 588 | 20 | 34 |
| 706 | 24 | 34 |

Le ciment est mélangé avec de l'eau dans le malaxeur pendant 2 minutes. Les fibres sont ajoutées et mélangées dans la pâte de ciment pendant 2 minutes. L'échantillon est ensuite testé en utilisant un test d'étalement. Pour chaque dosage et géométrie, un nouvel échantillon est préparé. Les échantillons présentant des signes d'instabilité n'ont pas été pris en compte.

### 4.2 Résultats expérimentaux et discussion

Nous présentons les résultats expérimentaux sous la forme du seuil d'écoulement relatif (rapport entre le seuil d'écoulement de la pâte de ciment avec et sans fibres) afin d'étudier une influence des fibres comme on le fait classiquement dans le cas d'inclusions rigides.

#### 4.2.1 Influence de la nature de pâte ciment

Dans la Figure 1, le seuil d'écoulement relatif des pâtes de ciment fraîches avec des fibres est tracé en fonction du dosage des fibres. Une dispersion de 13 % est trouvée en répétant l'expérience cinq fois sur les fibres avec R = 353 (L = 12 mm, D = 34 µm) à 1 % vol. Cette valeur est supposée comme la dispersion pour tous les résultats présentés dans ce travail.

On trace le seuil d'écoulement relatif en fonction du $\boldsymbol{\phi}\tau_0{}^{-1/5}$ dans la Figure 1, à droite. On observe que la flexion des fibres dépend de la nature de la pâte de ciment. Dans la pâte de ciment ferme, les fibres ont une tendance de fléchir plus et, logiquement, dans la pâte de ciment fluide, les fibres fléchissent moins.

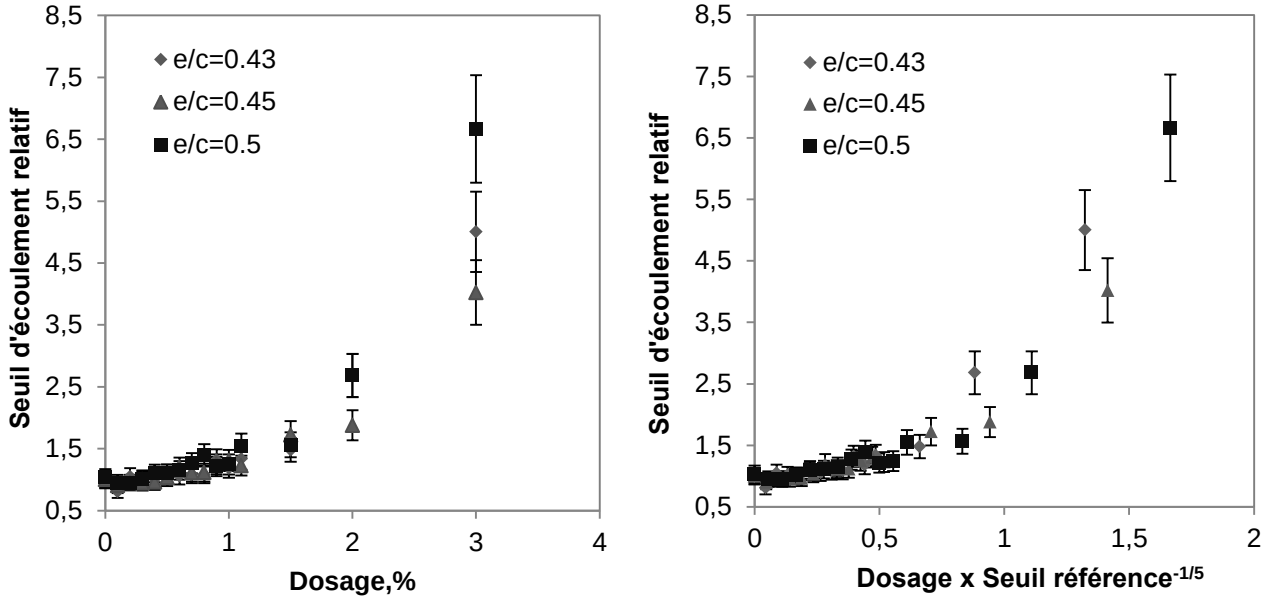


Figure 1. Seuil d'écoulement relatif en fonction du dosage pour les trois pâtes de ciment (à gauche). Seuil d'écoulement relatif en fonction du dosage x seuil d'écoulement de la pâte non fibrée à la puissance (-1/5) (à droite).

### 4.2.2 Influence du dosage des fibres

On peut aussi étudier l'influence du dosage en fibres sur le seuil d'écoulement en utilisant les données de la Figure 1, à gauche et des Figures 2 et 3. Comme prévu, le seuil d'écoulement augmente avec l'augmentation du dosage en fibres. On peut voir qu'après le dépassement d'une certaine concentration de fibres critique, une valeur du seuil d'écoulement augmente rapidement en raison des contacts directs entre les fibres.

### 4.2.3 Influence de la géométrie des fibres

Dans la Figure 2 on présente les résultats d'un seuil relatif en fonction du dosage en fibres pour neufs géométries de fibres. On observe tout de suite le fait que le seuil d'écoulement n'augmente pas proportionnellement au facteur d'aspect. Nous traçons la Figure 3 afin d'étudier l'effet de la longueur et du diamètre des fibres sur le seuil relatif. Nous observons que l'augmentation de la longueur des fibres conduit à l'augmentation du seuil. Au contraire, l'augmentation du diamètre de la fibre entraîne une diminution du seuil d'écoulement.

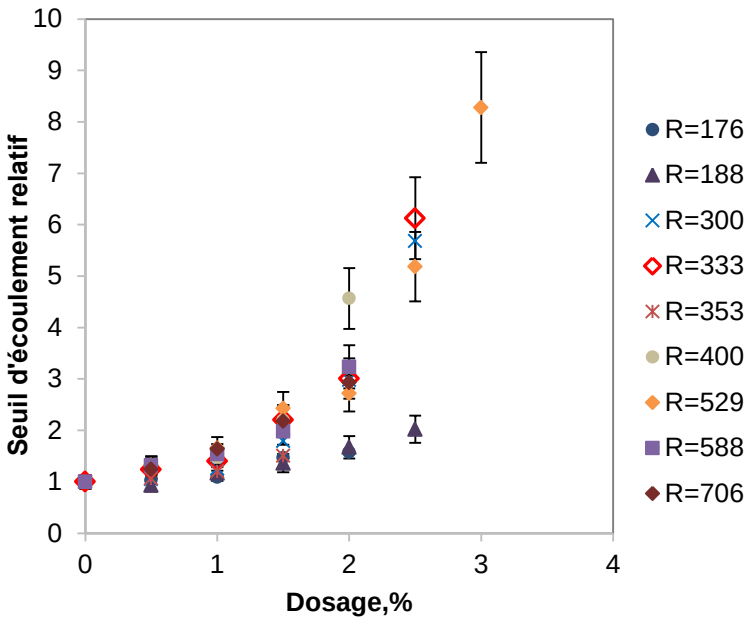


Figure 2. Seuil d'écoulement relatif en fonction du dosage pour différentes géométries de fibres.

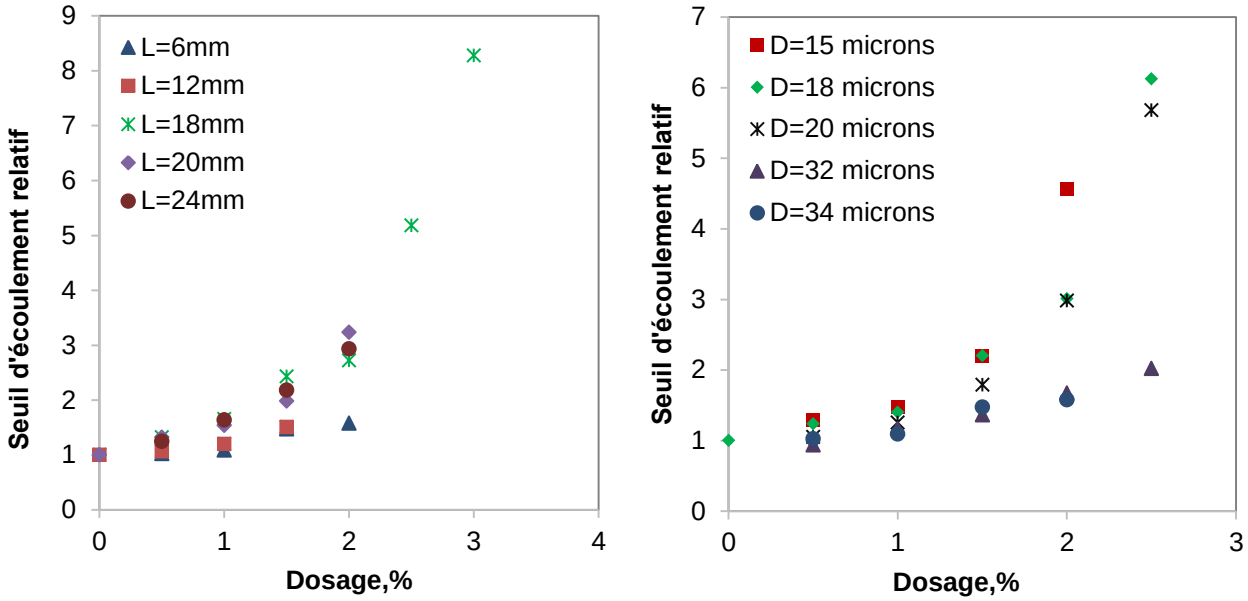


Figure 3. Seuil d'écoulement relatif en fonction du dosage pour différentes géométries de fibres (à gauche : D = 34 µm et L = 6, 12, 18, 20 et 24 mm; à droite : L = 6 mm et D = 15, 18, 20, 32 and 34 µm).

### 4.2.4 Comparaison avec des fibres rigides

Dans cette partie de nos études, on essaie de comparer la rhéologie des pâtes de ciment avec fibres flexibles à la rhéologie d'une pâte de ciment avec fibres rigides. Dans la Figure 4 nous avons tracé les résultats présentés à la Figure 2 en traçant le seuil d'écoulement en fonction de l'empilement relatif. Comme présenté au paragraphe 3.3, l'évolution du seuil d'écoulement peut être décrite en fonction de l'empilement relatif dans le cas de fibres rigides. On observe bien pour de faibles dosages en fibres que le seuil d'écoulement du matériau avec des fibres est dicté par le seuil d'écoulement de la pâte de ciment.

Avec une augmentation du dosage en fibres et après la formation d'un réseau connecté, les contacts directs par frottement commencent à dominer dans le système. Par conséquent, il est logique d'observer que les données sont beaucoup plus dispersées avec une augmentation du dosage des fibres. Nous pouvons conclure que l'influence des fibres flexibles est beaucoup plus complexe que celle des fibres rigides en raison de leur flexion.

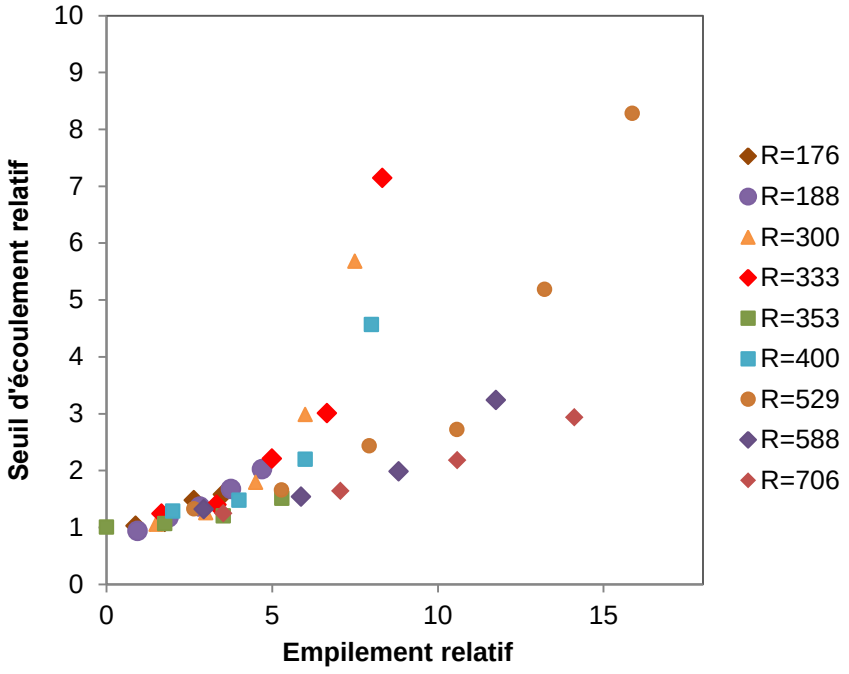


Figure 4. Seuil d'écoulement relatif en fonction de l'empilement relatif $\phi R$.

## 5. CONCLUSION

Le but de ce travail est d'étudier l'impact des fibres flexibles sur la rhéologie des matériaux cimentaires renforcés de fibres. Des essais d'étalement ont été effectués sur des pâtes de ciment fraîches contenant des fibres de polypropylène de diverses géométries à des dosages différents. L'influence du dosage et de la géométrie des fibres a été présentée et analysée. On a prouvé que la flexion des fibres souples dépend fortement de la nature du fluide de suspension. D'après les résultats, il a été possible de conclure que la rhéologie du matériau renforcé de fibres flexibles ne peut pas être caractérisée de la même manière que la rhéologie du matériau renforcé de fibres rigides.


### Remerciements

Opération est réalisée avec le concours du Programme d'Investissements d'Avenir du Gouvernement français dont la gestion a été confiée à l'ANDRA.


### Références


Bilodeau A., Kodur V.K.R., Hoff G.C., Optimization of the type and amount of polypropylene fibres for preventing the spalling of lightweight concrete subjected to hydrocarbon fire, *Cement and Concrete Composites* 26: 163-174, 2004.

Krieger I.M., Dougherty T.J., A mechanism for non-Newtonian flow in suspensions of rigid spheres, *Transactions of the Society of Rheology* 3:137-152, 1959.

Martinie L., Rossi P., Roussel N., Rheology of fiber reinforced cementitious materials: classification and prediction, *Cement and Concrete Research* 40:226-234,210.

Philipse A.P., The random contact equation and its implication for (colloidal) rods in packings, suspensions and anisotropic powders, *Langmuir* 12 :1127-1133,1996.

Roussel N., *Understanding the rheology of concrete*, 1st edition, Woodhead Publishing, Cambridge, UK, 2011.

Shuttleworth P., Fire protection of precast concrete tunnel linings on the Channel Tunnel Rail Link, Concrete, 35: 12-22, 2001.

Szwabowski J., Ponikiewski,T., Rheological properties of fresh concrete with polypropylene fibres, 3rd International Conference on Concrete and Concrete Structures, Zilina, Slovakia :331-338, 2002.