



**HAL**  
open science

## Les fluides électrorhéologiques

Jean-Numa Foulc, Frédéric Ayela, Olivier Tillement

► **To cite this version:**

Jean-Numa Foulc, Frédéric Ayela, Olivier Tillement. Les fluides électrorhéologiques. 17ème Congrès Français de Mécanique, Communication, Aug 2005, Troyes, France. N° S6 325, 6 p. hal-00370877

**HAL Id: hal-00370877**

**<https://hal.science/hal-00370877>**

Submitted on 25 Mar 2009

**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.

# Les fluides électrorhéologiques

Jean-Numa Foulc <sup>(a)</sup>, Frédéric Ayela <sup>(b)</sup>, Olivier Tillement <sup>(c)</sup>

<sup>(a)</sup> Laboratoire d'Electrostatique et de Matériaux Diélectriques, CNRS, BP 166 - 38042 Grenoble Cedex 9

<sup>(b)</sup> Centre de Recherches sur les Très Basses Températures, CNRS, BP 166 - 38042 Grenoble Cedex 9

<sup>(c)</sup> Laboratoire de Physico-Chimie des Matériaux Luminescents, la Doua, 69622 Villeurbanne

## Résumé :

Un fluide électrorhéologique (ER) est constitué de fines particules dispersées dans un liquide diélectrique. Sous l'action d'un champ électrique, les particules s'attirent pour former des fibres reliant les électrodes parallèlement à la direction du champ électrique. Cette structuration entraîne une profonde modification des propriétés d'écoulement du fluide. Sous champ élevé, ses propriétés mécaniques s'apparentent à celle d'un gel solide. Cet état « solide » est caractérisé par la contrainte maximale qu'il peut supporter (sa valeur dépend du champ électrique) qui sert de critère de performance pour le fluide ER. Sous champ plus faible, on obtient un fluide à viscosité variable. Ces fluides dont on peut contrôler les propriétés mécaniques par l'application d'un signal électrique ouvrent des perspectives d'application dans le domaine des dispositifs électromécaniques « intelligents » (coupleurs, amortisseurs actifs, actionneurs...).

## Abstract :

An electrorheological (ER) fluid is a suspension of small particles in a dielectric liquid. Upon the application of an electric field, particles attract each other to form a network of fibers aligned with the field. This fibrillation exhibits a drastic change of the rheological properties of the fluid. For high electric fields an apparent phase transition is observed from a liquid state to a solid-like state characterized by a threshold stress (a yield stress) depending on the electric field strength. For moderate fields the fluid flows and his apparent viscosity also depends on the field strength. These ER fluids that the rheology can be continuously controlled by an external electric signal enable the development of electromechanical smart devices (clutches, active damper systems, actuators...).

## Mots clefs :

**Electrorhéologie ; fluides à seuil ; matériaux diélectriques ; champ électrique.**

## 1 Introduction

L'écoulement des fluides en présence d'interactions électriques (fluide soumis à un champ électrique, dispersion de particules dans un liquide, microfluidique...) est un domaine d'étude vaste et complexe en raison de la diversité des situations rencontrées et de la présence de nombreux phénomènes physiques susceptibles de jouer un rôle dans le comportement des systèmes étudiés. Dans cette présentation, nous distinguerons deux catégories de situation relatives à des fluides dont la résistance à l'écoulement peut être modifiée par des grandeurs électriques, i) l'électroviscosité, ii) l'électrorhéologie.

### 1.1 Electroviscosité

L'électroviscosité correspond à une variation de la viscosité apparente d'un fluide engendrée par un effet électrique. Le fluide reste toujours en état d'écoulement. Plusieurs situations peuvent être envisagées :

- fluide homogène (monophasique) à base de solutions de cristaux liquides dont l'anisotropie de forme leur confère une orientation privilégiée lors de l'application d'un champ électrique et provoque une forte augmentation (dans un rapport  $> 30$ ) de la viscosité du fluide [1]. L'intérêt principal des ces fluides est leur bonne stabilité (pas de sédimentation) mais ils ont aussi quelques inconvénients : leur viscosité sans champ est assez élevée et leur plage de fonctionnement en température est relativement limitée.

- liquide isotrope soumis à une injection de charges sous l'action d'un champ électrique. L'injection de charges engendre un écoulement secondaire qui perturbe l'écoulement principal du liquide et accroît sa viscosité [2]. L'augmentation de viscosité peut être importante (dans un rapport > 20).
- écoulement d'un liquide généré par un gradient de pression en présence d'une double couche électrique apparaissant à la paroi du canal en contact avec le liquide ou autour de particules en suspension dans le liquide. Ce phénomène assez général prend naissance à l'interface solide/liquide et se traduit par l'établissement de deux zones (ou couches) chargées électriquement : une couche compacte très mince, adsorbée à la surface du solide et liée à celui-ci, et une couche diffuse plus épaisse qui entoure le solide et assure l'électronéutralité de l'ensemble (les deux couches sont de signe opposé). Ces charges électriques proviennent de composés ioniques ou électrolytiques présents dans le liquide ou sont créées par réaction chimique entre le solide et le liquide. L'écoulement du liquide va déformer ou entraîner la couche diffuse et les interactions électrostatiques entre la paroi (et/ou les particules en suspension) et la couche diffuse qui en résultent créent une force qui tend à s'opposer à l'écoulement, augmentant ainsi la viscosité apparente du fluide. Un effet comparable est obtenu avec une suspension concentrée de particules chargées [3]. La perturbation reste limitée pour des dispersions de particules et n'intervient au niveau des parois qu'en présence de canaux de très petites tailles (écoulement microfluidique).
- suspension de particules dans un liquide diélectrique soumis à un gradient de pression, avec des particules plus isolantes que le liquide porteur. L'application d'un champ électrique conduit à une séparation des phases liquide et solide (particules) ou à la rotation des particules dans le sens de la vorticité et se traduit par une diminution, pouvant aller jusqu'à un rapport 5, de la viscosité de la suspension [4,5].

## 1.2 Electrorhéologie

L'electrorhéologie revêt un caractère plus général et s'applique à des suspensions concentrées, appelées fluides electrorhéologiques (ER), de fines particules solides dans un liquide diélectrique. Les fluides ER ont la propriété remarquable de pouvoir se « solidifier » en présence d'un champ électrique, avec un temps de réponse de quelques millisecondes, puis de reprendre leur propriété initiale dès que le champ électrique est supprimé. En réalité, ce changement réversible de phase « solide/liquide » met en compétition deux effets antagonistes : des forces électriques internes (induites par le champ électrique) qui structurent les particules en fibres reliant les électrodes (le liquide, piégé entre les fibres, ne peut s'écouler et le fluide ER se comporte comme un corps solide) et des forces mécaniques extérieures (écoulement ou cisaillement du fluide) qui rompent, ou tendent à rompre, le réseau de fibres et permettent au liquide de s'écouler plus ou moins facilement (le fluide ER se comporte alors comme un liquide à viscosité variable [6,7]).

## 2 Les fluides electrorhéologiques

### 2.1 Caractérisation

La caractérisation principale d'un fluide ER est donnée par la variation de la contrainte mécanique en fonction du gradient de vitesse et du champ électrique appliqué [8]. Ce relevé s'effectue généralement en écoulement de Couette et en géométrie cylindrique. Sous réserve de certaines conditions dimensionnelles, cette configuration permet de se ramener au cas simple d'un cisaillement entre deux plaques planes parallèles entre lesquelles se trouve le fluide ER. Les plaques conductrices qui constituent les électrodes soumises à une différence de potentiel  $V$  créent au sein du fluide un champ électrique  $E$  constant :  $E = V/e$  ( $e$ , distance entre les électrodes). La caractéristique obtenue montre généralement que le comportement rhéologique d'un fluide ER s'apparente à celui d'un liquide plastique de type Bingham (Fig. 1) :

$$\tau(E, \dot{\gamma}) = \tau_s(E) + \eta_0 \dot{\gamma} \quad (1)$$

$\tau$  : contrainte (Pa),  $\tau_s$  : contrainte seuil,  $\dot{\gamma}$  : gradient de vitesse ( $s^{-1}$ ),  $\eta_0$  : viscosité dynamique de la suspension (Pa.s) à champ électrique nul,  $E$  : champ électrique (usuellement compris entre 2 et 5 kV/mm).

La valeur de la contrainte seuil  $\tau_s$  est la caractéristique principale d'un fluide ER. Pour les fluides ER courants la valeur maximale de  $\tau_s$  est d'environ 5 kPa. L'évolution de  $\tau_s$  en fonction du champ électrique et des nombreux paramètres et phénomènes associés (caractéristiques des constituants, type de structuration, température, conditions expérimentales...) n'est pas établie de manière précise et complète.

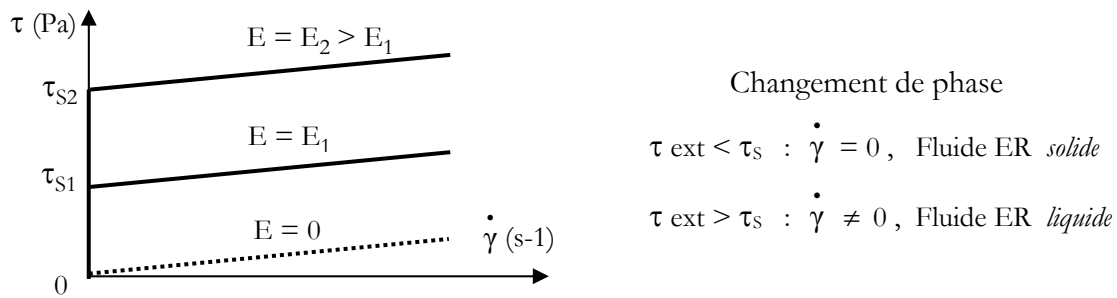


FIG. 1 - Représentation schématique du rhéogramme d'un fluide ER mettant en évidence les deux états possibles (*solide - liquide*) du fluide. Le comportement du fluide est de type Bingham pour  $E \neq 0$  et newtonien pour  $E = 0$ .  $\tau_s$  représente la contrainte seuil (dynamique).

Néanmoins, une relation simplifiée permet de faire apparaître quelques éléments de modélisation :

$$\tau_s \propto \phi \epsilon_L E^n \quad (2)$$

$\phi$  : fraction volumique des particules,  $\epsilon_L$  : permittivité du liquide,  $E$  : intensité du champ électrique ( $1 < n < 2$ ).

De plus, chaque état du fluide possède sa propre caractérisation :

a) *état solide*, en déformation oscillatoire d'amplitude  $\gamma$  et de pulsation  $\omega$  [9] :

$$\tau(\omega) = [G'(\omega) + i G''(\omega)] \gamma(\omega) \quad (3)$$

$G'$  : module de conservation (élasticité),  $G''$  : module de perte (viscosité).

b) *état liquide*, en écoulement continu sous contrainte  $\tau$  et avec un gradient de vitesse  $\dot{\gamma}$  [10] :

La grandeur associée est la viscosité apparente  $\eta_{app}$  définie par :

$$\eta_{app} = \tau / \dot{\gamma} = \eta_0 (1 + K/Mn) \quad (K \text{ constante, } Mn : \text{nombre de Mason}) \quad (4)$$

$$Mn = \frac{\text{Forces hydrodynamiques}}{\text{Forces électriques}} \cong \eta \dot{\gamma} / \epsilon_L E^2 \quad (\epsilon_L : \text{permittivité du liquide}) \quad (5)$$

Concernant les caractéristiques électriques des fluides ER la grandeur la plus importante est la densité de courant  $j$ . En courant continu et pour un dispositif donné, cette valeur permet de calculer la puissance de commande  $P_C$  ( $P_C = \text{tension} \times \text{courant}$ ) puis, en associant la puissance transmise  $P_T$  ( $P_T = \text{couple} \times \text{vitesse}$ ) de déterminer le gain en puissance  $G_p$  :

$$G_p = P_T / P_C = C \Omega / UI \quad (6)$$

## 2.2 Constitution

Un fluide ER comprend une phase liquide et une phase solide (particules en suspension). La fraction volumique usuelle des particules est d'environ 30 à 40 %. Afin d'éviter la sédimentation des particules, leur densité doit être la plus proche possible de celle du liquide. Pour élaborer un fluide ER il est nécessaire d'utiliser des particules de conductivité électrique supérieure à celle du liquide.

Le choix des matériaux détermine en grande partie les performances d'un fluide ER (valeur de la contrainte seuil, densité du courant...) [11]. Un grand nombre de couples liquide/particules solides, produit un effet ER et une multitude de résultats expérimentaux a été publiée concernant de « nouvelles suspensions ER » avec des bilans sensiblement les mêmes, du moins jusqu'à ces dernières années :

a) *phase liquide* : le choix d'un liquide n'est pas le point le plus important pour constituer un fluide ER. Il doit néanmoins être un bon isolant électrique, même à température élevée et sous champ électrique intense, et si possible, avoir une faible viscosité ( $\eta < 30$  mPa.s) et une permittivité moyenne ( $\epsilon_r \sim 3-5$ ). Les liquides couramment utilisés peuvent être classés en trois catégories : les huiles minérales aux propriétés « standards », les huiles silicones (bonne stabilité en température) et les liquides chlorés (densité et permittivité « élevées »).

b) *phase solide* : c'est la phase solide qui conditionne presque à elle seule les performances d'un fluide ER. La connaissance des caractéristiques nécessaires pour produire un effet ER intense a pendant longtemps été ignorée. Ce n'est que depuis une dizaine d'années que des travaux ont montré que les propriétés de conduction des matériaux et les effets d'interface étaient déterminants dans la mise en œuvre de l'effet ER. Ceci justifie a posteriori les observations faites pendant des décennies sur la nécessité d'utiliser des poudres hydratées pour produire un effet ER (les poudres séchées sont sans effet) et qu'un taux d'humidité trop élevé diminue l'effet. En se basant sur cette propriété, on peut classer les différents constituants solides utilisés (les particules) en trois catégories, i) les matériaux homogènes isolants (silice, amidon, cellulose...) nécessitant l'apport d'un activant extérieur (eau, surfactant). Ces matériaux sont peu stables en température, ii) les matériaux homogènes à conductivité intrinsèque, ionique ou électronique (zéolites, polymères semi-conducteurs : polyaniline...), iii) les matériaux inhomogènes (multicouches) dont la surface est rendue active (silice recouverte de polyaniline, aluminium recouvert d'une couche isolante...). Par ailleurs, certains matériaux ferroélectriques (titanate de baryum...) produisent un effet ER en alternatif, à fréquence élevée.

### 3 L'effet électrorhéologique

Depuis la découverte de l'effet ER par Winslow dans les années 40 de nombreux travaux et résultats importants ont permis de mieux comprendre les mécanismes de base de l'effet ER, d'élaborer des fluides plus performants et d'étudier la faisabilité de nouvelles applications.

#### 3.1 Mécanismes

La justification de l'effet ER a été établie dès les premiers travaux de Winslow [12] : l'application d'un champ électrique de quelques kV/mm à une dispersion silice/kérosène, structure presque instantanément les particules en fibres et solidifie la suspension. L'explication de cette structuration, et notamment la nature de l'interaction entre les particules, a longtemps reposé sur l'hypothèse que les matériaux utilisés (particules solides et liquides) possédaient des permittivités  $\epsilon$  différentes ( $\epsilon_s > \epsilon_l$ ) et étaient des isolants parfaits (conductivité électrique nulle). Ainsi, la prise en compte de la seule polarisabilité a conduit à une modélisation de la force d'attraction entre les particules (modèle de polarisation) basée sur l'approche dipolaire ou multipolaire et l'interaction entre particules voisines [13]. Les résultats ainsi obtenus sont assez éloignés de ceux fournis par l'expérience et les propriétés de conduction des matériaux, essentielles en courant continu, sont ignorées. L'importance de la prise en compte de la conductivité des matériaux a par la suite été soulignée [14,15] et une nouvelle approche (modèle de conduction) a été proposée et vérifiée expérimentalement [16,17]. Ce modèle valable en champ continu, ou alternatif basse fréquence, repose sur :

i) la prise en compte de la conduction des matériaux pour déterminer la répartition du courant électrique entre les particules et le liquide (cas de deux particules sphériques en contact, immergées dans un liquide et soumises à un champ électrique longitudinal). La répartition du courant s'effectue en deux zones définies par : (a) un disque de rayon  $\delta$  centré sur le point de contact des particules (dans cette zone le courant passe dans le liquide), (b) la zone extérieure au disque de rayon  $\delta$  (le courant passe en totalité dans les particules). La distribution du champ électrique est ensuite établie avec comme hypothèses, une valeur constante du champ dans la zone (a) et une équipotentialité de la particule dans la zone (b),

ii) le calcul de la force d'attraction entre deux particules (rayon R, conductivité  $\sigma_s$ ) en présence d'un liquide diélectrique (conductivité à champ faible  $\sigma_{l0}$ , permittivité  $\epsilon_l$ ) alignées avec le champ électrique (intensité  $E_0$ ). Le calcul s'établit par intégration de la pression électrostatique ( $\epsilon_l E^2/2$ ) sur la surface des zones (a) et (b).

A ce niveau il est tenu compte du renforcement du champ électrique dans la zone de contact entre particules et de sa conséquence sur l'augmentation de conductivité du liquide (dissociation de paires d'ions, injection de charges au niveau des électrodes...). Deux situations sont prises en compte, a) application d'un champ électrique faible ( $E_0 < 0,1$  kV/mm) : le champ effectif dans la zone de contact reste limité (quelques

kV/mm) et la conductivité du liquide est considérée comme constante, b) application d'un champ électrique élevé ( $E_0 > 1$  kV/mm) : le champ effectif dans la zone de contact atteint alors quelques dizaines de kV/mm et la conductivité du liquide est fortement augmentée ( $\sim$  loi exponentielle).

Le résultat obtenu fait apparaître deux régimes de variation de la force en fonction du champ électrique :

$$\text{- régime quadratique en champ faible } (E_0 < 0,1 \text{ kV/mm}) : F = 4\pi\epsilon_L (RK_\Gamma)^2 \Gamma^2 E_0^2 \quad (7)$$

$$\text{- régime linéaire en champ élevé } (E_0 > 1 \text{ kV/mm}) : F = 2 \pi\epsilon_L R^2 E_C [\text{Ln}[(10 \Gamma/\pi)(2 E_0/E_C)^{1/2}]]^2 E_0 \quad (8)$$

avec,  $\Gamma = \sigma_S/\sigma_{L0}$ ,  $K_\Gamma = f(\Gamma)$ ,  $E_C \cong 0,34$  kV/mm (valeur liée aux caractéristiques du liquide).

Cette modélisation fait aussi apparaître l'effet du rapport des conductivités  $\Gamma$  des constituants. Un effet ER important nécessite une valeur de  $\Gamma > 100$  et une conductivité maximale des particules  $\sigma_{S,max} \approx 10^{-5}$  S/m.

Le mécanisme général conduisant à l'établissement de l'effet ER est le suivant [18], i) polarisation des particules dès l'application d'un champ électrique : attraction (ou répulsion) des particules entre elles en fonction de leur position relative initiale, ii) mise en contact des particules alignées avec le  $E_0$  champ, apparition des fibres (chaînes ou colonnes) et passage d'un courant électrique à travers les particules fibrées, présence de l'effet ER (temps de réponse  $\sim$  ms), iii) formation d'agrégats de fibres (processus lent  $\sim$  mn).

### 3.2 Applications

Les dispositifs à effet ER actuels concernent principalement le domaine des transmissions hydrauliques en mode écoulement, cisaillement ou traction/compression. Les deux fonctionnalités des fluides ER peuvent être mises à profil : viscosité variable (raideur de suspension, amortisseur de vibrations, organe de freinage...) ou changement réversible de phase liquide/solide (embrayage, valve, immobilisation de pièces...). Toutefois, si la première fonctionnalité (viscosité variable) a déjà donné lieu à des réalisations, la deuxième (changement de phase) reste plus difficile à mettre en œuvre en raison de la sollicitation beaucoup plus forte imposée au fluide en particulier pour sa solidification en écoulement. D'autres applications plus spécifiques mettant à profit la propriété de structuration des particules peuvent aussi être envisagées (applications sonores, optiques...).

## 4 Situation actuelle et perspectives

Des progrès récents dans le domaine des matériaux ont permis d'élaborer de nouveaux fluides ER possédant des valeurs de contrainte seuil de plusieurs dizaines de kPa [19]. Des chercheurs chinois de l'université de Hong Kong viennent même d'obtenir avec une suspension de nanoparticules dans de l'huile silicone une contrainte seuil de cisaillement atteignant 130 kPa, pour un champ électrique continu de 5 kV/mm [20]. Ce résultat remarquable qui bouleverse la compréhension fondamentale de l'effet ER devrait susciter des travaux complémentaires concernant l'étude de ce nouvel effet ER « géant » et déboucher dans un proche avenir sur des applications réelles.

L'étude et le développement des fluides ER et des technologies associées nécessitent de rassembler et de mettre en synergie des compétences pluridisciplinaires. A cet effet, nous venons de constituer un groupe de recherche s'appuyant sur des compétences complémentaires en électrorhéologie (modélisation et caractérisation), en matériaux (nanoparticules fonctionnalisées, liquide) et en microfabrication (outils de caractérisation et microdispositifs applicatifs, microfluidique). Ce groupe bénéficie du soutien financier de partenaires institutionnels (CNRS, Ministère de la recherche). Les premiers travaux nous conduisent à synthétiser des nanoparticules hybrides formées par un cœur d'oxyde dense, un revêtement polysiloxane et une fonctionnalisation organique externe. Dans cette étude, pour obtenir des comportements électrorhéologiques intenses, l'utilisation de molécules organiques fortement polarisables et/ou favorisant une fibrillation stable à de très faibles tailles nous semble particulièrement intéressante. Différentes pistes seront explorées : type de fonctions organiques, longueur de chaîne, taux de greffage, balance hydrophile / hydrophobe, charges de surface, etc. L'étude de la structuration des particules à petite échelle ( $\sim 100 \mu\text{m}$ ) et son incidence sur l'effet ER (dynamique et propriétés de la fibrillation) sera effectuée sur des microsystèmes. Pour la fabrication des microsystèmes tridimensionnels étanches et leurs connexions hydrauliques, nous utiliserons les technologies fondées sur l'emploi de résines photosensibles épaisses (SU8). Un effort particulier sera porté sur l'intégration par dépôt métallique et la connectique d'électrodes localisées.

Différentes configurations de microcanaux munis d'électrodes planes verticales générant un champ électrique perpendiculaire à l'écoulement des suspensions serviront à déterminer la contrainte seuil et la viscosité apparente des fluides. Ces systèmes seront les précurseurs des démonstrateurs applicatifs de l'effet ER (coupleurs mécaniques, microactionneurs...).

## Conclusion

L'étude de l'effet ER connaît un regain d'intérêt depuis une dizaine d'années. Une meilleure connaissance des mécanismes de base de l'effet (interaction entre particules et structuration) et des progrès récents dans le domaine des matériaux (particules hybrides fonctionnalisées en surface) ont conduit à l'élaboration de fluides ER à contrainte seuil très élevée ( $> 100$  kPa). Ces nouveaux fluides devront être testés en terme de stabilité, de réversibilité et de vieillissement avant de pouvoir envisager leur utilisation dans des applications industrielles, mais le résultat important est qu'on dispose maintenant de fluides ER très performants dotés d'une grande rigidité mécanique à l'état solide.

## References

- [1] I.K. Yang and A.D. Shine, Electrorheology of a nematic poly(n-hexyl isocyanate) solution, *J. Rheol.* **36**, 1079-1104 (1992).
- [2] P. Atten and T. Honda, The electroviscous effect and its explanation I- The electrohydrodynamic origin; study under unipolar D.C. injection, *J. Electrostatics* **11**, 225-245 (1982).
- [3] J.A. Menjivar and C. Rha, A theory of the electroviscous effect: A method for the estimation of the viscosity of dispersions of charged spherical colloidal particles, *J. Chem. Phys.* **79**, 953-956 (1983).
- [4] C. Boissy, P. Atten and J.N. Foulc, On the negative electrorheological effect, *J. Electrostatics* **35**, 13-20 (1995).
- [5] L. Lobry and E. Lemaire, Viscosity decrease induced by a DC electric field in a suspension, *J. Electrostatics* **47**, 61-69 (1999).
- [6] H. Block and J.P. Kelly, Electro-rheology, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **21**, 1661-1677 (1988).
- [7] A.P. Gast and C.F. Zukoski, Electrorheological fluids as colloidal suspensions, *Adv. Colloid Interface Sci.* **30**, 153-202 (1989).
- [8] E. Lemaire, G. Bossis and Y. Grasselli, Rheological behavior of electrorheological fluids, *Langmuir* **8**, 2957-2961 (1992).
- [9] G.B. Thurston and E.B. Gaertner, Viscoelasticity of electrorheological fluids during oscillatory flow in a rectangular channel, *J. Rheol.* **35**, 1327-1343 (1991).
- [10] L. Marshall, C.F. Zukoski and J.W. Goodwin, Effects of electric fields on the rheology of non-aqueous concentrated suspensions, *J. Chem. Soc. Faraday Trans. 1* **85**, 2785-2795 (1989).
- [11] H. Block and P. Rattray, Recent developments in ER fluids, in *Progress in Electrorheology*, edited by K.O. Havelka and F.E. Filisko (Plenum Press, New York, 1995), p. 19-42.
- [12] W.M. Winslow, Induced fibrillation of suspensions, *J. Appl. Phys.* **20**, 1137-1140 (1949).
- [13] P.M. Adriani and A.P. Gast, A microscopic model of electrorheology, *Phys. Fluids* **31**, 2757-2768 (1988).
- [14] L.C. Davis, Polarization forces and conductivity effects in electrorheological fluids, *J. Appl. Phys.* **72**, 1334-1340 (1992).
- [15] J.N. Foulc, N. Félici et P. Atten, Interprétation de l'effet électrorhéologique, *C.R. Acad. Sci. Paris* **314**, Série II, 1279-1283 (1992).
- [16] P. Atten, J.N. Foulc and N. Félici, A conduction model of the electrorheological effect, *Int. J. Modern Physics B* **8**, 2731-2745 (1994).
- [17] C. Boissy, P. Atten and J.N. Foulc, The conduction model of electrorheological effect revisited, *Int. J. Modern Physics B* **10**, 2991-3000 (1996).
- [18] R. Tao and Q. Jiang, Structure formation in electrorheological fluids, in *Progress in Electrorheology*, edited by K.O. Havelka and F.E. Filisko (Plenum Press, New York, 1995) p. 325-333.
- [19] X.P. Zhao and X. Duan, A new organic/inorganic hybrid with high electrorheological activity, *Int. J. Modern Physics B* **16**, 2454-2460 (2002).
- [20] W. Wen, X. Huang, S. Yang, K. Lu and P. Sheng, The giant electrorheological effect in suspensions of nanoparticles, *Nature Materials* **2**, 727-730 (2003).