

A - PRÉSENTATION DU PROJET DOCTORAL

TITRE DU PROJET : COLLOÏDES SOUS CHAMP : UN SYSTEME MODELE DE LA MATIERE ACTIVEE

DIRECTEURS DE THÈSE : DAVID GONZALEZ-RODRIGUEZ ET LYDIANE BECU (LCP-A2MC)

MOTS-CLES : COLLOÏDES, MAGNETISME, MATIERE ACTIVE, VISCOELASTICITE, MICROFLUIDIQUE

DESCRIPTION DU PROJET :

Les assemblages de particules colloïdales ont fait l'objet d'un intérêt croissant ces dernières années, non seulement pour leurs diverses applications technologiques, mais également parce qu'ils reproduisent des phénomènes décrits par la physique de la matière condensée à une échelle expérimentale accessible (longueur de l'ordre du micron, temps de l'ordre de la seconde). De plus la possibilité de varier les interactions inter-particules permet de contrôler et de tester des comportements collectifs analogues à ceux rencontrés à l'échelle atomique.

Lorsque les particules colloïdales possèdent des propriétés paramagnétiques, il est possible de contrôler leurs interactions à l'aide d'un champ magnétique extérieur : on peut alors caractériser par microscopie optique la structure obtenue et les phénomènes dynamiques en fonction du champ appliqué, qui peut être un champ statique [1,2,3] ou dynamique [4,5].

Dans ce projet, nous proposons **de développer un système modèle de la matière activée** à base de colloïdes paramagnétiques (Fig. 1). Tandis que la matière active est tenue hors équilibre par une source d'énergie interne aux composantes du système, la matière activée est tenue hors équilibre par une source d'énergie externe. Cette source d'énergie confère une agitation des particules bien plus importante que l'agitation thermique, ce qui donne lieu à des propriétés physiques nouvelles. Un exemple de matière activée est celui des systèmes granulaires vibrés [6], où des grains posés sur une table vibratoire effectuent des sauts aléatoires en raison du frottement variable avec le substrat, ce qui permet de définir une température effective de ce système activé [7]. Dans notre cas l'agitation aléatoire des colloïdes est générée par le couplage entre un champ magnétique dynamique, source d'énergie, et le frottement hétérogène avec le substrat.

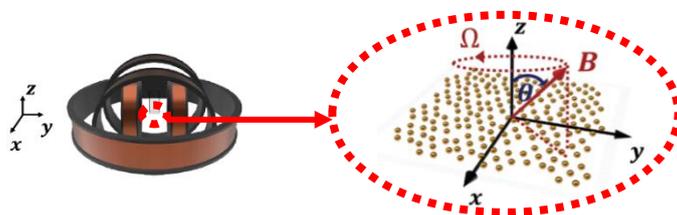


Figure 1 : Schéma du dispositif de champ magnétique triaxial dynamique (gauche) et de l'assemblage de colloïdes magnétiques (droite).

Le système proposé est constitué d'une monocouche de courts bâtonnets de billes colloïdales (dimères ou trimères) confinés par la gravité sur un substrat. L'assemblage de billes magnétiques en bâtonnets est maîtrisé au laboratoire, et leur comportement dynamique sous un champ tournant attractif, localisé dans le plan de la monocouche, a fait l'objet d'une étude récente [8].

Lorsqu'un champ magnétique orthogonal au plan de la monocouche est appliqué, les bâtonnets développent un moment dipolaire colinéaire au champ qui tend à les orienter le long des lignes de champ. Une étude

théorique portant sur un dimère de billes magnétiques non liées a montré qu'à mesure que l'intensité du champ magnétique externe augmente, 3 états distincts peuvent être obtenus : un état horizontal (dimères allongés sur le substrat), un état intermédiaire incliné et un état vertical (dimères redressés perpendiculairement au substrat) [9], ce qui est confirmé par nos observations expérimentales. Les interactions dipolaires sont alors essentiellement répulsives, et peuvent être modulées par l'angle d'orientation entre l'axe du bâtonnet et le moment dipolaire. La première partie de la thèse portera sur une investigation des **structures statiques de monocouches de bâtonnets** soumises à un champ orthogonal, et visera à étudier comment l'orientation variable des bâtonnets impacte l'organisation structurale de la monocouche.

Par la suite, un champ magnétique orthogonal dynamique sera appliqué au système. Nous étudierons alors la **dynamique du système** induite par la variation de l'orientation des dimères et des interactions dipolaires répulsives couplées à la friction avec le substrat. L'étude de cette agitation contrôlée permettra de déterminer si elle est comparable à de l'agitation thermique et, de manière similaire aux granulaires vibrés, si une température effective contrôlable du système peut être définie. Une application possible de cette étude est de pouvoir **obtenir un système expérimental binaire composé d'éléments de températures effectives différentes**, similaire à celui étudié par simulations numériques par Elismaïli et al. [10].

Dans une seconde partie du projet, on s'intéressera aux **systèmes binaires** constitués d'éléments aux **interactions hétérogènes**. Expérimentalement, un tel système peut être réalisé à partir d'un **mélange de billes simples et de bâtonnets** placés dans les mêmes conditions de champ répulsif statique. Les propriétés structurales du système seront étudiées, et ces résultats seront confrontés à des simulations numériques réalisées avec le code LAMMPS, en bénéficiant de l'expertise de Pr. Hong Xu, qui participera à l'encadrement de ce projet de thèse. En se basant sur une compétence locale acquise depuis quelques années, les simulations numériques permettront également d'accéder aux **propriétés mécaniques** de ces systèmes binaires [11].

Afin de caractériser expérimentalement les propriétés mécaniques d'une suspension colloïdale, nous utiliserons les déformations induites par des écoulements en **canal de microfluidique**. Ces canaux seront fabriqués par un procédé existant dans notre laboratoire avec la collaboration de M. Jean-Pierre Gobeau, assistant ingénieur. La microfluidique est un moyen adapté pour caractériser les propriétés mécaniques de la suspension colloïdale pour deux raisons : d'une part, elle permet de visualiser les colloïdes sous microscope optique pour suivre leur déplacement ; d'autre part, la puce microfluidique peut être insérée dans le montage de champ magnétique afin de pouvoir appliquer le champ extérieur pendant l'expérience.

L'évaluation des propriétés mécaniques s'appuiera sur deux configurations microfluidiques, montrées dans la Fig. 2. La première configuration (Fig. 2 A), inspirée du viscosimètre microfluidique proposé par Galambos et Foster [12], est un canal de largeur constante dont la section transversale comporte deux hauteurs différentes, $h_2 > h_1$. Comme le gradient de pression le long du canal est constant, mais que la résistance hydraulique diminue quand la hauteur augmente, la vitesse est plus grande dans la partie du canal plus haute, $V_2 > V_1$. Les vitesses ressenties par la suspension ne sont pas les vitesses moyennes du fluide, mais celles à la hauteur du barycentre des colloïdes. Puisque le nombre de Reynolds est très faible, le rapport des vitesses est obtenu à partir de la loi de Poiseuille. Dans le cas où le rayon des particules a est petit par rapport à la hauteur du canal h , on obtient que $V_2/V_1 \sim h_2/h_1$. Ainsi, la suspension colloïdale est soumise à un cisaillement latéral dû à la différence de vitesse entre le côté gauche et le côté droit du canal. L'application de ce cisaillement permet de mesurer la viscosité de la suspension.

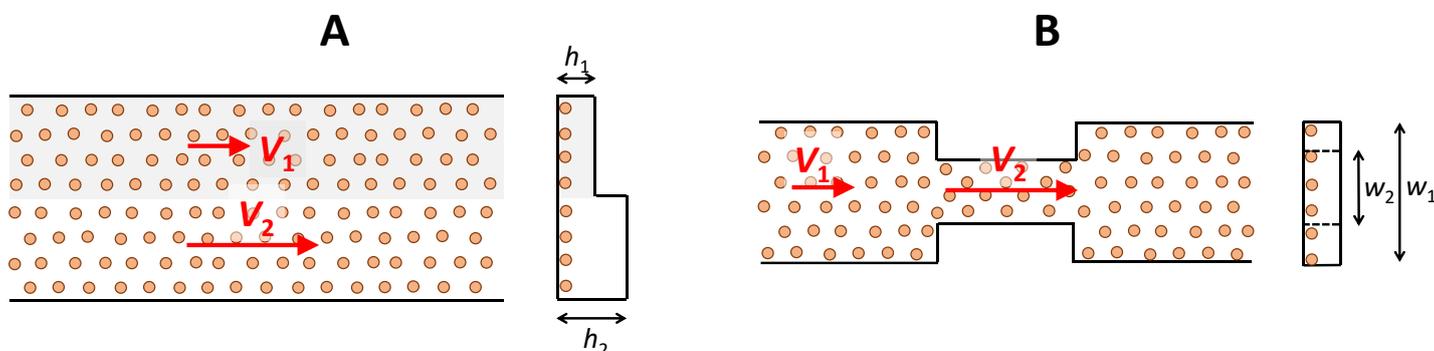


Figure 2 : Configurations des canaux de microfluidique envisagées. **A** : Canal avec deux hauteurs différentes, $h_1 < h_2$, pour induire un cisaillement de la suspension entre les deux côtés. **B** : Canal avec deux largeurs différentes, $w_2 < w_1$, de façon à induire un écoulement élongationnel de la suspension colloïdale dans le rétrécissement.

La deuxième configuration (Fig. 2 B), largement utilisée en microfluidique [13], consiste en un rétrécissement d'un canal rectangulaire. Ainsi, le canal est de hauteur constante mais il présente deux largeurs différentes, $w_2 < w_1$. La conservation de la masse de fluide implique une vitesse plus grande dans le rétrécissement, $V_2/V_1 = w_1/w_2$, et par conséquent un écoulement élongationnel. Cet écoulement induit l'étirement de la suspension colloïdale, ce qui permet de mesurer sa réponse viscoélastique élongationnelle. Les expériences porteront initialement sur un étirement soudain, pour un rétrécissement abrupt comme montré dans la figure, et elles pourront ensuite évoluer vers des géométries de rétrécissement progressif permettant des étirements graduels, ainsi que vers l'utilisation d'écoulements oscillants permettant de caractériser la réponse fréquentielle de la suspension colloïdale.

En conclusion, la thèse comporte 3 objectifs qui correspondent aux 3 années de thèse. La première année portera sur l'étude de la suspension de bâtonnets homogènes sous champ statique ou dynamique. La deuxième année étendra l'étude à un système binaire de billes et de bâtonnets, qui sera caractérisé par une combinaison d'expériences et de simulations numériques. Les expériences de microfluidique seront abordées en fin de la deuxième année et se poursuivront en troisième année. Ce projet ambitieux est ainsi constitué de plusieurs volets indépendants, ce qui facilitera des éventuels ajustements du plan de thèse si cela s'avère nécessaire.

Références

- [1] L. Spiteri, R. Messina, D. Gonzalez-Rodriguez et L. Bécu, Ordering of sedimenting paramagnetic colloids in a monolayer, *Phys. Rev. E* 98, 02061(R) (2018).
- [2] R. Messina, S. Al Jawhari, L. Bécu, J. Schockmel, G. Lumay et N. Vandewalle, Quantitatively mimicking wet colloidal suspensions with dry granular media, *Sci. Rep.* 5, 10348 (2015).
- [3] L. Bécu, M. Basler, M. L. Kulic et I. M. Kulic, Resonant reshaping of colloidal clusters on a current carrying wire, *Eur. Phys. J. E* 40, 107 (2017).
- [4] M. Elismaili, L. Bécu, H. Xu et D. Gonzalez-Rodriguez, Dissipative non-equilibrium dynamics of self-assembled paramagnetic colloidal clusters, *Soft Matter* 17, 3234 (2021).
- [5] M. Elismaili, L. Bécu, H. Xu et D. Gonzalez-Rodriguez, Rotation dynamics and internal structure of self-assembled binary paramagnetic colloidal clusters, *J. Chem. Phys.* 155, 154902 (2021).
- [6] G. D'Anna, P. Mayor, A. Barrat, V. Loreto et F. Nori, Observing brownian motion in vibration-fluidized granular matter, *Nature* 424, 909 (2003).
- [7] F. Zamponi, F. Bonetto, L. F. Cugliandolo et J. Kurchan, A fluctuation theorem for non-equilibrium relaxational systems driven by external forces, *J. Stat. Mech.: Theory Exp.*, 2005, P09013 (2005).
- [8] A. H. Hamid, D. Gonzalez-Rodriguez, H. Xu et L. Bécu, Dynamics of paramagnetic permanent chains and self-assembled clusters under a rapidly rotating magnetic field, *J. Chem. Phys.* 161, 164905 (2024).
- [9] E. Kemgang, H. Mohrbach et R. Messina, Magnetic dimer at a surface: Influence of gravity and external magnetic fields, *Eur. Phys. J. E* 43, 46 (2020).
- [10] M. Elismaili, D. Gonzalez-Rodriguez et H. Xu, Activity-modulated phase transition in a two-dimensional mixture of active and passive colloids, *Eur. Phys. J. E* 45, 86 (2022).
- [11] D. Li, O. Greffier et H. Xu. Linear viscoelasticity of a two-dimensional glass-former by stress-fluctuation formalism. *Mol. Phys.* 118, e1597988 (2020).
- [12] P. Galambos et F. Foster, An optical micro-fluidic viscometer, *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition* 15960, 187-191 (1998).
- [13] C. Pipe et G. H. McKinley, Microfluidic rheometry, *Mechanics Research Communications*, 36, 110-120 (2009).