

Soutenance de stage de fin d'études : Diffusion contrainte de colloïdes paramagnétiques sur un substrat

Paul Tragus

Février - Juillet 2025

Laboratoire de Chimie et Physique – Approche Multi-échelles des Milieux Complexes
(LCP-A2MC)

Encadrants : **Lydiane Becu, David Gonzalez-Rodriguez**

Introduction

État de l'art

Colloïdes magnétiques : particules de nm à μm dans un fluide, sensibles aux champs magnétiques.

Applications : biomédecine (délivrance ciblée, imagerie), science des matériaux.

Systèmes granulaires : agitation mécanique induit des structures ordonnées [1].

Effet de cage : particules confinées par leurs voisines, diffusion subdiffusive dans les systèmes granulaires [2].

Etude de la dynamique d'auto-assemblage de systèmes colloïdaux à l'équilibre [3].

Contrôle par champs magnétiques : organisation en structures 1D, 2D, 3D [4].

Objectifs du stage

Étudier l'influence des champs magnétiques sur l'effet de cage pour des systèmes colloïdaux

Caractériser les propriétés structurelles et dynamiques de systèmes colloïdaux.

Méthodes & Système

Description du système

Système bidimensionnel : particules sédimentées sur un substrat.

Particules superparamagnétiques :

Répondent fortement aux champs magnétiques.

Intérêt : interactions magnétiques modulables, étude de la dynamique sous confinement.

Caractéristiques des particules

Dynabeads M-450 Epoxy :

Billes polymériques avec noyau d'oxyde de fer.

Diamètre : $4.5\ \mu\text{m}$.

Surface époxy pour stabilité.

Solution :

Sodium dodecyl sulfate (SDS) : $2.1\ \text{g L}^{-1}$, charge négative pour éviter l'aggrégation.

Concentration standard : $2.11\ \text{particules}/1000\ \mu\text{m}^2$.

Solution mère : $50\ \mu\text{L}$ de Dynabeads dans $3\ \text{mL}$ de SDS.

Champ magnétique et interaction dipolaire

Rôle du champ :

$$\vec{m} = \chi \vec{H} V$$

où χ : susceptibilité magnétique, \vec{H} : champ appliqué, V : volume de la particule.

Favorise une distribution homogène ou un ordre cristallin (1.56 mT).

Interaction dipolaire :

$$E_{\text{dip}} = \frac{\mu_0}{4\pi r^3} [(\vec{m}_1 \cdot \vec{m}_2) - 3(\vec{m}_1 \cdot \hat{r})(\vec{m}_2 \cdot \hat{r})]$$

où μ_0 : perméabilité du vide, \hat{r} : vecteur unitaire de séparation des particules.

$$U_2 = \frac{3 \cos^2 \theta - 1}{d^3} m^2$$

$$\vec{F}_2 = \frac{3(1 - 3 \cos^2 \theta) m^2}{d^4} \hat{r}$$

où θ : angle entre le champ et la ligne joignant les particules, m : moment dipolaire, d : distance entre particules, \hat{r} : vecteur unitaire. Attraction si $0^\circ \leq \theta < 54.09^\circ$, répulsion si $54.09^\circ < \theta \leq 90^\circ$.

Montage expérimental

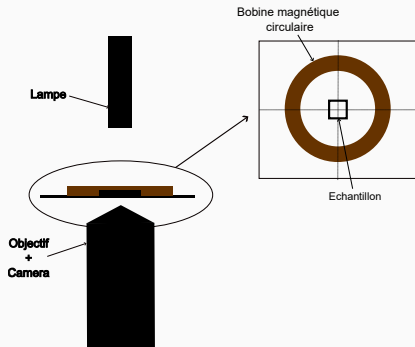


Figure 1 – Schéma du dispositif expérimental

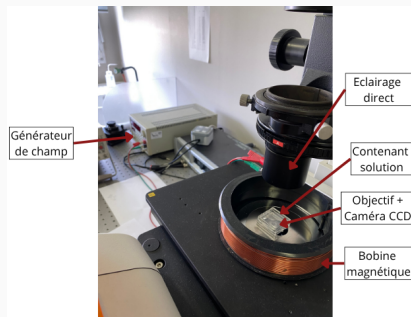


Figure 2 – Photo du dispositif

Traitement d'image

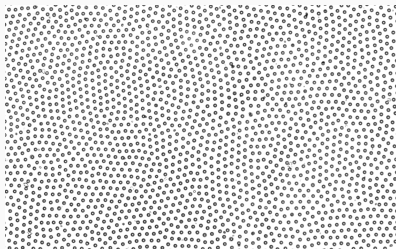


Figure 3 – Avant traitement
(2.11 particules/1000 μm^2 , 1.56 mT, Dynabeads M-450 Epoxy).

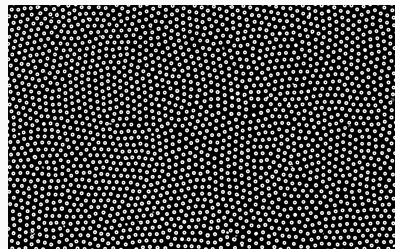


Figure 4 – Après traitement
(2.11 particules/1000 μm^2 , 1.56 mT, Dynabeads M-450 Epoxy).

Problèmes expérimentaux

Formation de chaînes :

Champ vertical peut atteindre 1.84 mT (C_{standard}).

Bilan énergétique :

$$E_{\text{total}} = E_{\text{mag}} + E_{\text{grav}} = -\vec{m} \cdot \vec{B} + mgz$$

Champ aligne les moments, gravité maintient les particules au sol.

Mouvements convectifs

Contenant : Lamelles abandonnées, boîte en plexiglas
(3 × 3 cm) choisie

Résultats

Trajectoires brutes

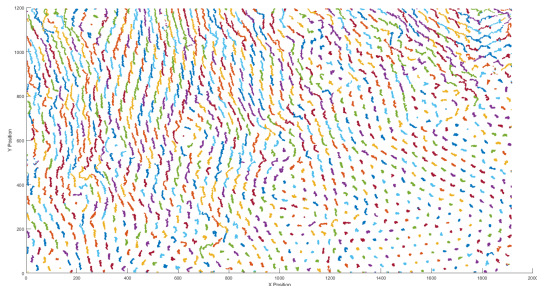


Figure 5 – Trajectoires de 1300 billes sur 15 min, intervalle 15 s, 2.11 particules/1000 μm^2 , 1.56 mT.

Mouvements convectifs visibles (coin supérieur gauche).

 quilibre atteint après 1 heure.

Déplacement quadratique moyen (MSD)

$$\text{MSD}(\tau) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \left[(x(t_i + \tau) - x(t_i))^2 + (y(t_i + \tau) - y(t_i))^2 \right]$$

$$\propto D \cdot \tau^\alpha$$

où D : coefficient de diffusion ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$). Régimes : sous-diffusif ($\alpha < 1$), normal ($\alpha = 1$), super-diffusif ($\alpha > 1$), plateau (confinement).

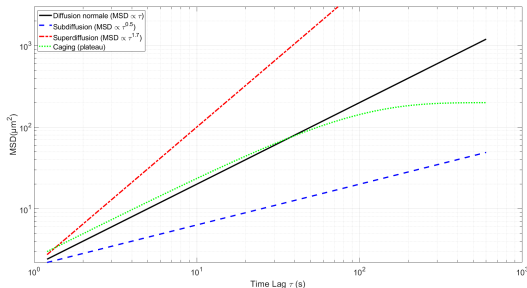


Figure 6 – Régimes de diffusion illustrés par le MSD.

Impact du champ magnétique externe

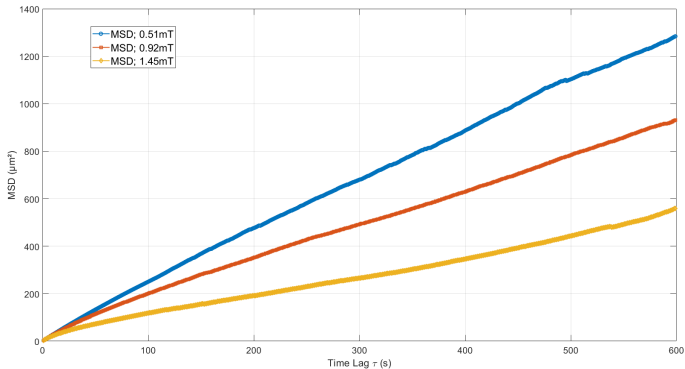


Figure 7 – Mesure de l'impact du champ sur la mesure. Concentration : 2.11 billes/1000 μm^2 , Dynabeads M-450 Epoxy

Impact de la concentration en billes

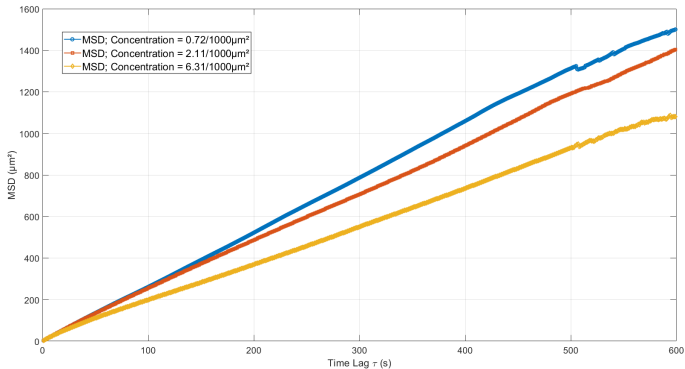


Figure 8 – Mesure de l'impact de la concentration sur la mesure. Intensité du champ : 0.95mT, Dynabeads M-450 Epoxy

Impact de la taille des particules

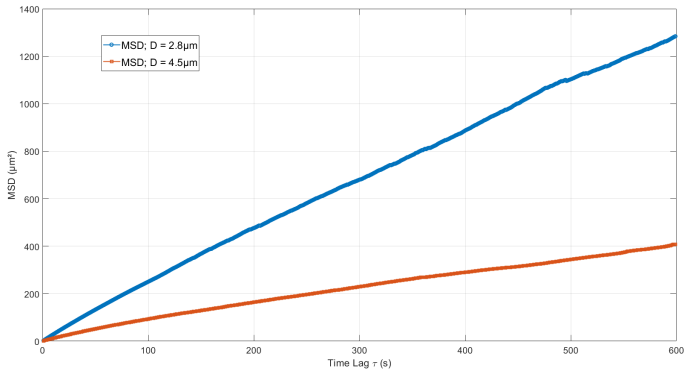


Figure 9 – Mesure de l'impact de la taille des billes (M-450 vs M-270). Intensité du champ : 0.95mT, Concentration : 2.06 billes/1000 μm^2

Influence des paramètres sur le MSD

Paramètre	Fort	Faible
Champ magnétique	-	+
Concentration	-	+
Taille des billes	-	+

+ : MSD plus élevé (moins de confinement). - : MSD plus faible (confinement accru).

Trajectoires & leur MSD

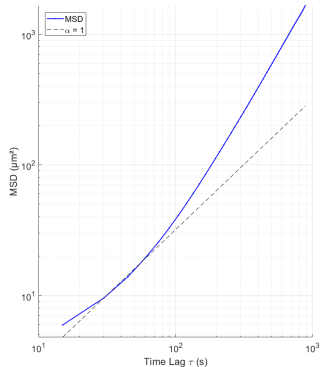
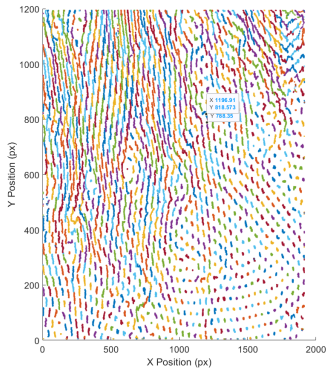


Figure 10 – Mesure standard (2.11 particules/1000 μm^2 , 1.56 mT, Dynabeads M-450 Epoxy). Trajectoires brutes et MSD associé.

Correction des trajectoires (globale)

$$v_x^{glob}(t_i) = \frac{1}{N \cdot \Delta t} \sum_{j=1}^N (x_j(t_i) - x_j(t_i - \Delta t)), \quad x_{corr}(t_i) = x(t_i) + \sum_{k=2}^i (-v_x^{glob}(t_k) \cdot \Delta t)$$

N : particules dans l'échantillon.

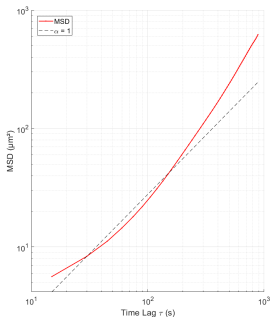
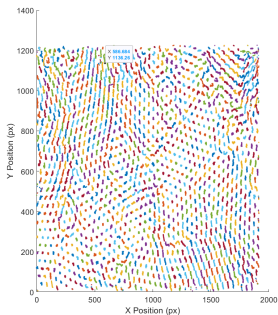


Figure 11 – Trajectoires corrigées (globalement) et MSD associé.

Correction des trajectoires (locale)

$$v_x(t_i) = \frac{1}{N_V \cdot \Delta t} \sum_{j=1}^{N_V} (x_j(t_i) - x_j(t_i - \Delta t)), \quad x_{corr}(t_i) = x(t_i) + \sum_{k=2}^i (-v_x(t_k) \cdot \Delta t)$$

N_V : particules dans $r = 55 \mu\text{m}$.

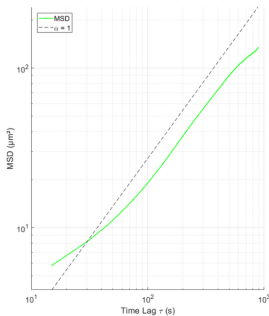
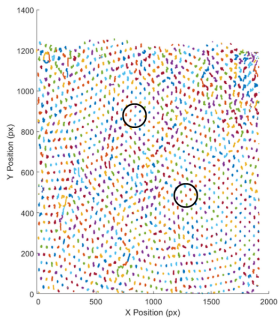


Figure 12 – Trajectoires corrig  es (locale) et MSD.

MSD en fonction du rayon de correction

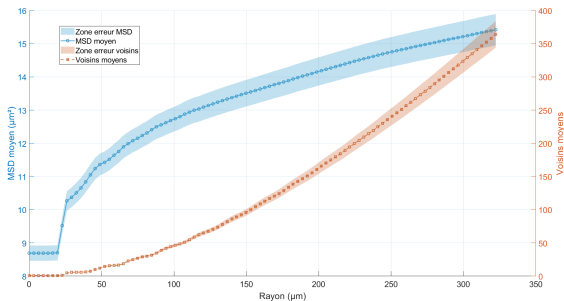


Figure 13 – MSD à τ_{\max} en fonction du rayon r , mesure standard

Montée abrupte du MSD à $r \approx 30 \mu\text{m}$.

Croissance quadratique des voisins ($\propto r^2$).

MSD dépendant de r : convection persistante.

Conclusion & Perspectives

Conclusion

Réalisations :

Conception du banc expérimental.

Traitement d'image (ImageJ) et analyse (MATLAB).

Recherche de l'effet de *caging* spécifique.

Perspectives

Protocole pour mesures à temps long.

Outil d'analyse par zones.

Système binaire (billes et bâtonnets) avec moments magnétiques différents.

Références i



René Messina, Sarah Aljawhari, Lydiane Bécu, Julien Schockmel, Geoffroy Lumay, and Nicolas Vandewalle.
Quantitatively mimicking wet colloidal suspensions with dry granular media.

Scientific Reports, 5(1) :10348, June 2015.



P.M. Reis.

Caging Dynamics in a Granular Fluid | Phys. Rev. Lett.

Références ii



Ludovic Spiteri, René Messina, David Gonzalez-Rodriguez, and Lydiane Bécu.

Ordering of sedimenting paramagnetic colloids in a monolayer.

Physical Review E, 98(2) :020601, August 2018.

Publisher : American Physical Society.



Mingsheng Wang, Le He, and Yadong Yin.

Magnetic field guided colloidal assembly.

Materials Today, 16(4) :110–116, April 2013.

Merci

Merci pour votre attention