Comportement vitreux et effet de cage dans un milieu granulaire

Olivier Dauchot, Guillaume Marty Frederic da Cruz

CEA-Saclay / SPEC Groupe Instabilités et Turbulence

Introduction

- Les expériences suggèrent une analogie entre milieux granulaires et systèmes vitreux.
 - La force de cette analogie réside dans le lien qu'elle établit entre des systèmes physiques **thermiques** et **a-thermiques**.
- Les systèmes vitreux présentent un comportement sous-diffusif à temps courts, dont l'origine est un effet de piégeage intermittent, appelé « effet de cage »
 - <u>Simulations</u> de dynamique moléculaire (liquides de Lénard-Jones et sphères dures)
 - <u>Expériences</u>: suspensions colloïdales, bruit télégraphique local (AFM) dans des films de polymères, RMN multi-dimensionnelle
- ICI :
 - Peut-on donner un sens précis à l'analogie proposée? Est elle purement macroscopique ou est elle valable à l'échelle de la diffusion ?
 - Si OUI, quels sont les mécanismes microscopiques à l'origine de « l'effet de cage » ?
 - Etude expérimentale des propriétés de diffusion et des comportements microscopiques dans un milieu granulaire soumis à un forçage (non-thermique)

Dispositif expérimental

Un milieu granulaire sec 2D sous cisaillement cyclique



Le système

6000 particules Bi disperse (\emptyset =4 et 5mm) Cisaillement Quasi statique Volume Constant (Φ =0.86)

Le protocole

10 000 cycles
θmax=10°;
500 traceurs sont suivis
Une photo est prise à chaque cycle

■NB : Bien plus qu'une simulation ! (temps de calcul + pas de modèle de friction)

Trajectoire type: « Effet de Cage »



Dynamique de cages

Les cages sont petites comparées à la taille du grain

Des cages successives peuvent se recouvrir : image de sous-cages.

NOTA BENE

Typiquement la même taille (rapportée au diamètre des particules) que dans les expériences de suspension colloïdales.

Plus petites que dans les simulations numériques de liquide de Lénard-Jones.

Intermittence et sous-diffusion



- La distribution des déplacements sur un temps τ présente des **ailes larges**, caractéristiques d'un mouvement intermittent.
- Le facteur de non gaussianité dépend de l'échelle de temps τ $\alpha = \langle \Delta X^4 \rangle / (3 \langle \Delta X^2 \rangle^2) I$
- Crossover entre sous-diffusion à temps court et diffusion normale à temps long :

r*=0.3 and t*=300

Déplacements anti-correlés

 \mathbf{r}_{01}

0.4

0.5 r₀₁







pour comparaison: simulation de sphères dures (thermique)

$$\langle y_{12} \rangle = 0$$

$$\langle x_{12} \rangle < 0 \qquad r^* = 0.3$$

$$\text{ for } r_{01} < r^* \langle x_{12} \rangle = c \ r_{01}$$

$$\text{ for } r_{01} > r^* \langle x_{12} \rangle = cte$$



∀τ<t*, la saturation a lieu à r₀₁= r* : la taille des cages gouverne la dynamique
 Pour τ>t*, l'anti-corrélations diminue, voire disparaît : le temps moyen de séjour dans les cages gouverne la corrélation temporelle.







- Pour $\tau < t^*$, $\sigma(x_{12})$ croît avec r_{01} :
 - une particule s'étant beaucoup déplacé pendant τ a une plus grande propension à se déplacer beaucoup pendant l'intervalle τ suivant.
- $\sigma(y_{12}) \sim constant$
 - le déplacement a tendance à s'effectuer dans l'axe du mouvement précédent (mais pas forcément dans la même direction).
- Suggère la présence de <u>différentes populations plus ou moins mobiles</u>, et de lignes de déplacement (« string-like motion »).

Hétérogénéités dynamiques dans les verres



Evolution de t_1 à t_2 de *régions* de mouvements moléculaires *rapides* ou *lents* (hétérogénéité <u>spatiale</u>)

Les molécules peuvent passer d'une région à l'autre (hétérogénéité temporelle)

Cages et dynamique collective

A ce stade:

- Similitude verre-grains validée à l'échelle de la diffusion
- A présent :
 - Quelle est la nature des cages?
 - Combien de grains sont-ils impliqués dans une sortie de cage?
 - Que sont ici les hétérogénéités dynamiques?

Pour répondre à ces questions:

- \Rightarrow Suivre toutes les particules
- \Rightarrow Nouveau dispositif exp.





Observation de la dynamique





- La redistribution des vides permet les sorties de cages
- Dynamique facilitée (1-2-3) versus inhibée (2-3-4) : quelle statistique?
- Beaucoup de choses à étudier. Portée des corrélations spatiales?

Corrélation et effet de cage

 $T_i(r)$: temps pour le grain *i* de sortir du cercle de rayon *r*

La décroissance des fluctuations de $T_{i,\ell}$ $m_2(\ell) = <(T_{i,\ell} - T_{av})^2 > / <(T_{i,1} - T_{av})^2 >$ définit une <u>longueur de corrélation</u> L



La longueur de corrélation est maximale à l'échelle des cages : $L(r=0.3) \sim 7$ (\rightarrow mouvements de ~ 50 particules)

Conclusion et Perspectives

- L'analogie entre milieux granulaires et verres est vérifiée à l'échelle des propriétés de diffusion (→ au-delà des échelles de temps thermiques)
- Utilisation d'idées de la théorie des verres pour mieux comprendre les milieux granulaires denses.
- Réciproquement, un système expérimental de milieux granulaire dense est un bon outil pour étudier plus finement les phénomène de dynamique vitreuse à l'échelle des particules.

Dans un futur proche :

- Étude fine de la dynamique microscopique : (Clusters ?, Strings ?, Hétérogénéités dynamiques ?)
- Comparaison de la dynamique des corrélations avec les prédictions de la théorie de couplage de modes.
- Étude de la fonction réponse (→ Relation Fluctuation Dissipation, Teff?)
- Vieillissement avec ou sans compaction

Heterogeneities (II)

(Doliwa and Heuer)





- A rather long ranged structure
- Significant fluctuations in the local density
- Work under progress: spatio-temporal structure