



**HAL**  
open science

## Transition blocage/écoulement d'une suspension non brownienne dans un liquide

Maxym Burel, Olivier Bonnefoy

► **To cite this version:**

Maxym Burel, Olivier Bonnefoy. Transition blocage/écoulement d'une suspension non brownienne dans un liquide. Colloque STPMF 2015, LRGP (Laboratoire Réactions et Génie des Procédés); LEM3 (Laboratoire d'Etudes des Microstructures et de Mécanique des Matériaux); LIBio (Laboratoire d'Ingénierie des Biomolécules); IJL (Institut Jean Lamour), Apr 2015, Nancy, France. pp.N°Article 1 à 8. emse-01144014

**HAL Id: emse-01144014**

**<https://hal-emse.ccsd.cnrs.fr/emse-01144014>**

Submitted on 20 Apr 2015

**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.

# **Transition blocage/écoulement d'une suspension non brownienne dans un liquide**

BUREL Maxym<sup>a</sup>, BONNEFOY Olivier<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Ecole Nationale Supérieure des Mines, SPIN-EMSE, CNRS:UMR 5307, LGF, 158 cours Fauriel 42023 Saint-Etienne

## **Résumé**

Nous développons une étude sur les écoulements en conduite 2D à section rectangulaire. Peu d'études expérimentales sont réalisées dans le cas de particules transportées par un liquide. Pourtant, ces écoulements partagent des similitudes avec des expériences dont la mise en mouvement des particules dépend uniquement de la force gravitaire (Zuriguel 2003). Cependant, le phénomène de blocage des suspensions n'est pas un phénomène systématique. Il faudra donc parvenir à caractériser les éléments responsables du blocage comme par exemple les interfaces fluides-particules, les écoulements denses, les forces hydrodynamiques. Nous présentons ici, un modèle en exponentielle qui décrit la répartition des blocages dans l'écoulement. Puis nous présenterons sous forme de graphique une probabilité de blocage en fonction de l'ouverture d'une restriction.

**Mots-clés : Suspension, Blocage, Hydrodynamique, Milieux granulaires**

## **1. Introduction**

La physique des milieux granulaires est un domaine d'étude dont les répercussions se font sentir tant au niveau industriel qu'au niveau environnemental. Les études réalisées sur les suspensions concentrées sont certes présentes mais, ces expériences étant difficile à mettre en œuvre, bon nombre se basent sur une vision numérique (Chevalier 2006).

Le blocage correspond à l'état où les particules ne sont plus libres de se mouvoir. L'origine du blocage provient tout d'abord de la fraction volumique. En effet, plus cette dernière augmente, plus la probabilité de blocage augmente. Les expériences rhéologiques utilisent souvent la même configuration (géométrie de Couette ou disque plan-plan, Boyer 2011). Ces expériences travaillent principalement avec des écoulements stationnaires. Or, nous étudions des phénomènes instationnaires avec une composante aléatoire (le blocage n'est pas systématique). Cette caractéristique donne lieu à des cisaillements et à des forces hydrodynamiques qui créent des chaînes de forces entre particules i.e. des contacts plus ou moins persistants et intenses. Ces chaînes sont tout à fait nuisibles pour l'écoulement et augmentent la viscosité pouvant conduire jusqu'au blocage (D'Haene et al. 1993), ce qui est vrai quand la taille des particules est de l'ordre de la centaine de micromètres. Pour étudier le blocage, nous avons effectué des expériences faisant intervenir des suspensions de particules sphériques qui s'écoulent dans une conduite 2D à travers une restriction. Nous ferons varier des paramètres clés comme la vitesse du fluide, la fraction volumique de particules, mais aussi la taille de la restriction. Nous verrons ainsi comment ces paramètres peuvent influencer le blocage.

## 2. Matériel et Méthodes

### 2.1 Dispositif expérimental

Un système en deux dimensions a été construit afin d'observer le blocage d'une suspension de sphères monodisperses dans un liquide. Un système en deux dimensions présente des avantages et des inconvénients. Nous avons jugé pertinent de « sacrifier » la troisième dimension pour pouvoir visualiser sans problème le centre de l'écoulement. En effet, nous pouvons décrire avec précision comment s'orientent les particules et visualiser le réseau de contact (Figure 2). Certes, d'autres expériences donnent accès à ces informations (Toshihiro Kawaguchi, 2010) mais avec des équipements coûteux, et des images de moindre qualité. Pour limiter le blocage lié aux parois supérieure et inférieure de notre banc expérimental, nous avons ajusté l'épaisseur de la conduite pour obtenir une marge 15% par rapport au diamètre des particules. Nous sommes donc dans un cas de géométrie très confinée (verticalement).

Ce système se compose d'une partie principale qui correspond au point 1 sur la figure 1. C'est la conduite à section rectangulaire dont les dimensions sont : une hauteur de 7,5 mm, une largeur de 140 mm et une longueur de 1000 mm. Cette partie centrale est connectée à deux réservoirs (2 et 3) contenant respectivement le stock de billes et le liquide. Le système dans sa totalité est réalisé en Plexiglas, ce qui nous permet de visualiser le comportement du fluide et des billes dans chaque partie.

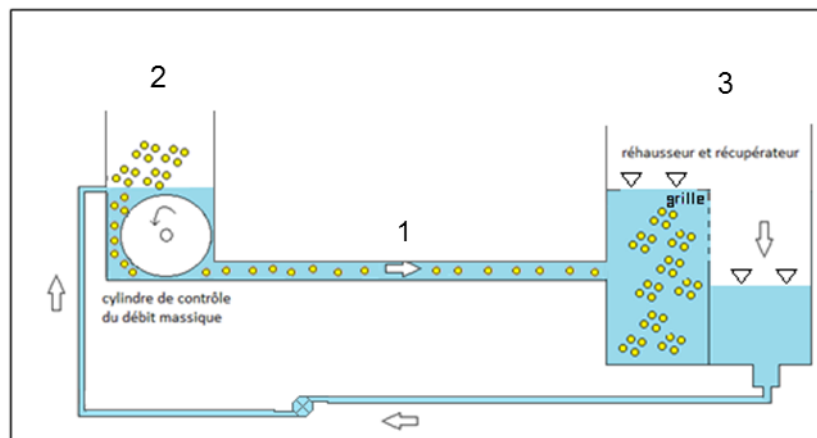


Figure 1. Schéma des deux réservoirs et de la conduite pour l'étude du blocage.

Pour obtenir une monocouche de grain (système 2D), nous utilisons une brosse déformable rotative (label 2 de la figure 1), cette brosse nous permet aussi de contrôler le débit massique en ajustant la vitesse de rotation. Nous prenons soin de toujours garder une partie des billes et le rouleau immergée afin d'éviter toute présence de bulles d'air. Ces dernières pouvant être responsable de la formation de pont gazeux ce qui modifierai complètement la dynamique des particules dans le liquide. Pour mettre en mouvement le fluide, nous utilisons une pompe péristaltique. La pompe que nous avons, nous donne accès à une gamme importante de débit de l'ordre du ml/min à quelques l/min. Enfin, pour simuler le blocage, nous disposons dans la conduite de plaques amovibles (figure 2) dont l'espacement peut être contrôlé précisément.

### 2.2 Matériaux

Pour cette expérience, nous utilisons des particules sphériques de 6 mm (de diamètre) de Polyéthylène dont la masse volumique est  $960 \text{ kg/m}^3$ . Ces objets sont indéformables et possède une rugosité négligeable. Les particules étudiées sont de tailles suffisamment grande ( $>100 \mu\text{m}$ ) pour que l'on puisse s'affranchir des effets indésirables des forces de Van der Waals ou encore des forces électrostatiques

(Dbouk 2013). Dans ces conditions particulières, les particules ne sont alors soumises qu'à des forces d'origines hydrodynamiques (Ancey 1999).

Pour transporter nos particules nous utilisons un mélange d'eau et de glycérol (70 wt%) dans des conditions toujours maintenues constantes (température et pression) afin d'éviter des modifications de masses volumiques et de viscosité. En réalisant ce mélange, nous parvenons à établir une condition dite iso-densité c'est-à-dire que nous avons un équilibre des masses volumiques du fluide avec les particules. Grâce à cela, nous pouvons négliger les effets de la gravité dans notre système.

### 2.3 Protocole

Chaque série d'expériences reposent sur le même mode opératoire. Pour chaque campagne, c'est-à-dire pour différentes tailles d'ouverture, nous avons enregistré des séquences d'images (figure 2). A partir de ces séquences, chaque particule s'écoulant à travers la restriction a été comptée. L'écoulement passe successivement par trois étapes. Dans un premier temps, lorsque nous injectons les particules dans le système, l'écoulement particulaire est alors en phase diluée (figure 2a).

En gardant le débit massique toujours constant, on constate que le régime évolue pour atteindre un état dense (figure 2b) à cause de la restriction. Cet état dense va évoluer vers un état bloqué, formant une arche. Une arche est une collection de particules qui bloquent l'écoulement particulaire (figure 2c).

Nous appellerons une avalanche (Zuriguél 2003) le nombre de particules s'écoulant à travers un orifice entre deux blocages consécutifs. De plus, dans le but de libérer ou de rompre les arches, pour que l'écoulement puisse repartir, nous appliquons un choc sur la face supérieure de la conduite. Une campagne se composant de 40 avalanches.

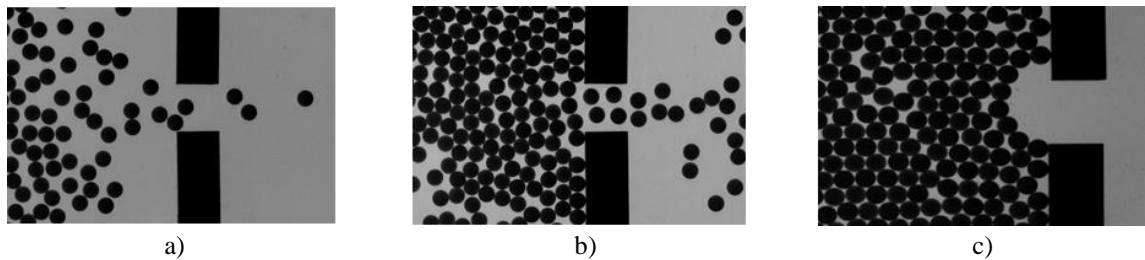


Figure 2. a) régime semi-dilué b) régime dense c) blocage avec la formation d'une arche provoqué par la restriction.

### 2.4 Suivi des particules

Nous avons utilisé une caméra haute vitesse (Photron), capable d'enregistrer une fenêtre de 1024x512 pixels à 200 images par secondes pour suivre les billes dans l'écoulement. De cette façon, nous avons étudié les mouvements des grains lorsque ceux-ci franchissent la restriction. Ensuite par une technique d'analyse d'images utilisant Matlab, nous avons été en mesure de compter le nombre de particules qui composent une avalanche entre deux blocages.

Matlab, nous permet d'obtenir par suivi des particules (reconnaissance des centres de masses), le champ des vitesses des particules (nous avons recréer à moindre échelle un particule tracking suivant une méthode PIV). Nous pouvons tracer leurs trajectoires et observer les chemins suivis par les particules à l'approche de la restriction.

### 3. Résultats expérimentaux

Dans la partie précédente, nous avons décrit une avalanche. Soit  $T_i$  le nombre de particules composant l'avalanche  $i$ , la figure 3 nous montre l'évolution de la taille d'une série d'avalanche successives. Comme nous pouvons le voir, cette taille présente une grande variabilité. En effet, on n'observe aucun schéma récurrent se dessiner. On peut supposer que lorsque l'on débloque l'arche, le réseau de particules formé en amont de l'orifice est désordonné. Cette particularité nous renseigne sur le caractère aléatoire du réseau et par conséquent, la taille de l'avalanche qui résulte du déblocage n'est pas reproductible.

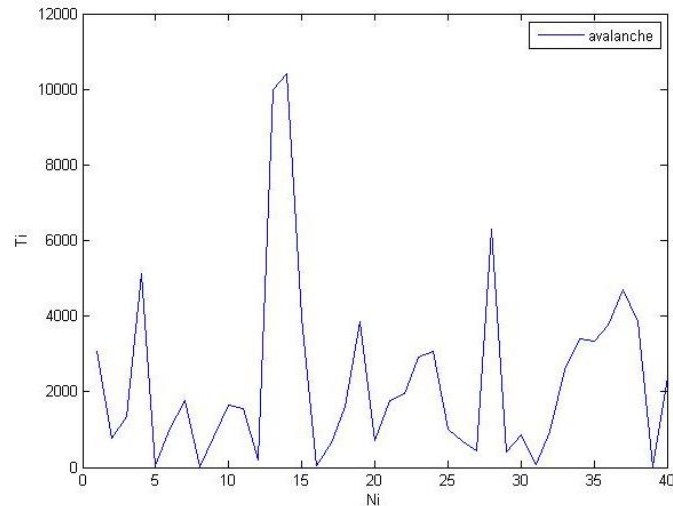


Figure 3. Tailles d'avalanches pour une ouverture d'orifice  $L=20$  mm.

En sachant cela, nous avons calculé le cumul  $C_k$  qui représente le nombre d'avalanches dont la taille est comprise entre 0 et  $T_k$  (où  $k \in \{1; \dots; k_{max}\}$ ). Concrètement, l'avalanche  $N_i$  est dans  $C_k$  si et seulement si le nombre de grains  $T_i$  de cette avalanche est compris entre 0 et  $T_k$ . Où  $T_k = \frac{T_{max}}{k_{max}}$ .

Nous avons tracé le cumul pour plusieurs ratio d'ouverture  $R = \frac{L}{d}$ , où  $L$  est la taille de l'orifice et  $d$  le diamètre des grains.

#### 3.1 Interpolation

Nous avons essayé de modéliser au mieux l'allure de la courbe expérimentale par une technique d'interpolation (équation 1). Le cas traité ci-dessous (figure 4) fait intervenir le cumul pour une ouverture d'orifice de 20 mm ( $R = 3.33$ ). Deux courbes y sont tracées, la première en bleu est la courbe issue des valeurs expérimentales. La seconde en vert provient du modèle se basant sur une extrapolation exponentielle.

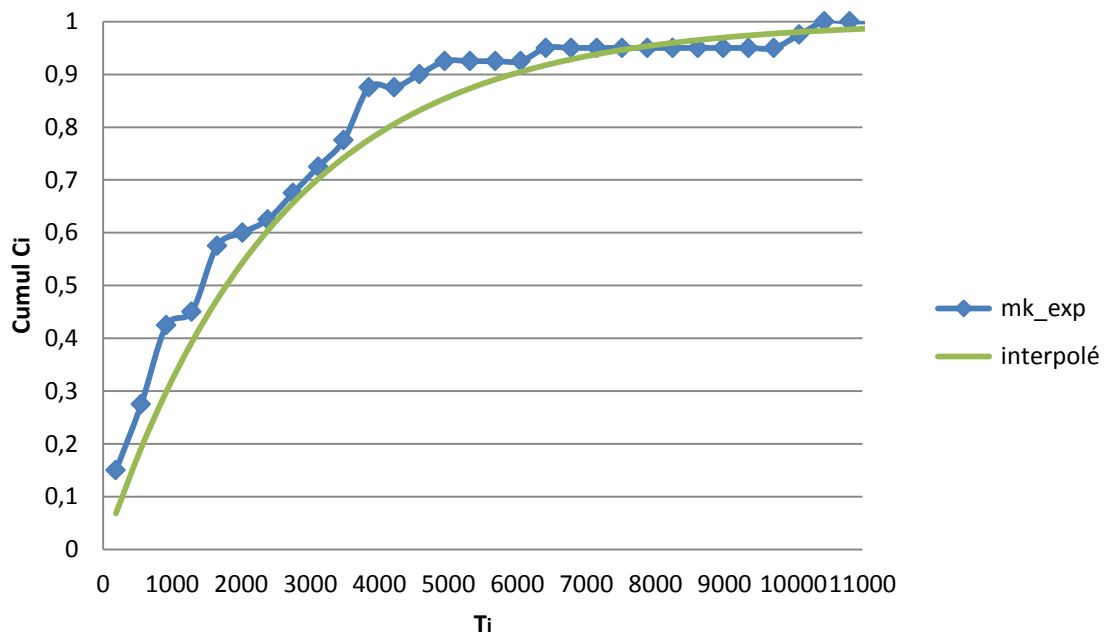


Figure 4. Cumul expérimental et modèle interpolé pour une ouverture  $R = 3.33$ .

Pour l'interpolation, nous posons :

$$m_k = f(T_k)$$

$m_k$  représente la fréquence cumulée, i.e. que l'on englobe toute les avalanches appartenant à une classe  $k$ .

Soit,

$$m_k = 1 - \exp\left(-\frac{T_k}{T^*}\right) \quad (1)$$

Avec  $T^*$  un paramètre ajustable, qui est la taille caractéristique des avalanches.

Comme nous le montre l'expression ci-dessus, chaque campagne peut se résumer en un seul scalaire  $T^*$ . C'est-à-dire que les cumuls peuvent s'exprimer uniquement avec ce paramètre ajustable.

### 3.2 Influence du ratio R

Nous avons normalisées la taille d'avalanche par sa moyenne  $\langle T_i \rangle$ . Puis nous avons tracé les cumuls pour 6 rapports d'ouverture R compris entre 1.6 et 3.33, comme le montre la figure 5. On constate que les courbes se superposent relativement bien. Cette analyse nous révèle que même si l'on augmente la taille des avalanches avec l'ouverture. Le phénomène de blocage reste donc similaire. Néanmoins, pour le rapport R = 2.25, la courbe se situe en dessous des autres. Le problème pourrait bien venir d'une erreur de manipulation ou tout simplement d'un nombre insuffisant de points.

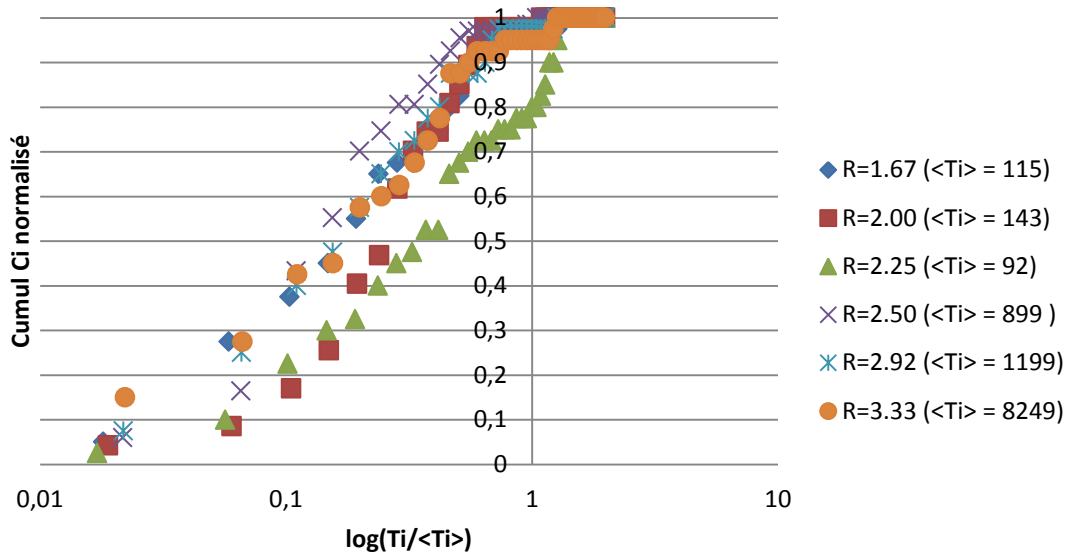


Figure 5: Evolution du cumul expérimental pour 6 tailles d'ouverture.

On peut alors via ce modèle, être en mesure de prédire l'évolution du cumul (figure 6). On remarque que l'évolution est linéaire pour de petits ratios. Mais lorsque nous atteignons une valeur limite ou seuil (ici 3.33) l'évolution suit alors une loi exponentielle. En suivant deux hypothèses majeures il existe une valeur critique de R et quand R tend vers cette valeur critique, on obtient une loi exponentielle. D'après la littérature (Martin 2014), nous pouvons suggérer que la loi d'évolution de la taille  $T^*$  suit une loi puissance (courbe rouge sur la figure 6) de la forme :

$$T^* \propto (R_c - R)^{-\gamma} \quad (2)$$

Où,  $R_c$  est une valeur critique ou le nombre de grain  $T_i$  croît exponentiellement,  $\gamma$  est un paramètre ajustable.

En utilisant la méthode des moindres carrés, nous parvenons à obtenir les valeurs suivantes :

$$R_c = 3.67 \text{ et } \gamma = 2.57.$$

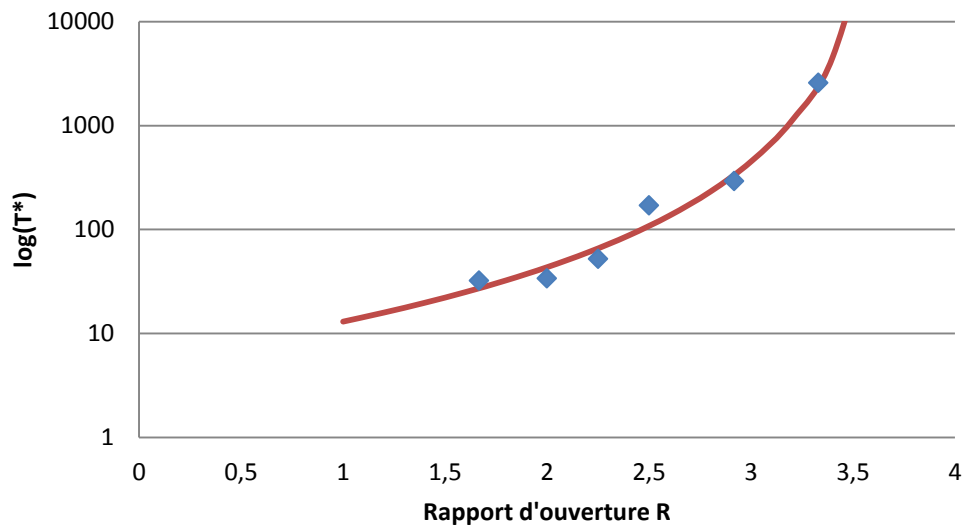


Figure 6. Evolution du rapport  $T^*$  en fonction du rapport d'ouverture en bleu les points issus des expériences, en rouge la loi de puissance.

#### 4. Conclusion et perspectives

Nous avons montré à travers ces expériences que le cumul est indépendant du rapport d'ouverture  $R$  mais dépend d'un paramètre qui est  $T^*$ . Cependant les tailles d'avalanches elles sont bien dépendantes de ce ratio et tendent à atteindre une valeur critique pour laquelle le blocage n'est pas possible. Nous avons pu prouver qu'une loi puissance (équation 2) était compatible pour prédire l'évolution des tailles d'avalanches en fonction du rapport d'ouverture. En insistant bien sur le fait qu'il existe un seuil où ce nombre diverge. Par la suite, nous réaliserons des expériences regroupant différentes tailles de particules typiquement de 100 microns à 6 mm où nous ferons varier les débits massiques et fluides. Enfin, nous montrerons l'influence de la morphologie sur les écoulements de suspension.



## Références

Ancey and Coussot, 1999 C. Ancey and P. Coussot. *Transition frictionnelle/visqueuse pour une suspension granulaire*. C.R. Acad. Sci. Paris, 327(Série II b), 1999.

Boyer, 2011, *Suspensions concentrées : expériences originales de rhéologie*, Aix-Marseille Université, 2011.

Chevalier, 2006, *Dynamique et instabilités des interfaces grains/fluide dans les suspensions non-Browniennes*, UNIVERSITÉ PARIS 6 – PIERRE ET MARIE CURIE, 2006.

Coussot and Ancey, 1999a P. Coussot and C. Ancey. *Rheophysical classification of concentrated suspensions and granular pastes*. Phys. Rev. E., 59:4445, 1999.

D’Haene et al., 1993 P. D. D’Haene, J. Mewis, and G. G. Fuller. *Scattering dichroism measurements of flow-induced structure of a shear thickening suspension*. J. Colloid Interface Sci., 156:350, 1993.

Martin Alexandre, 2008, *Etude du blocage d’écoulement dans une géométrie de silo*, irevues INIST.

Toshihiro Kawaguchi, 2010, *MRI measurement of granular flows and fluid-particle flows*, Advanced Powder Technology, Volume 21, Issue 3, Pages 235–241.

VanEgmond, 1997, *Macromolecules*, 30, 8045-8057, (1997).

Zuriguel Iker et al., 2003, *Jamming during the discharge of grains from a silo described as a percolating transition*,

---

## Jamming/flowing transition in a non Brownian suspension in a liquid.

BUREL Maxym<sup>a</sup>, BONNEFOY Olivier,

<sup>a</sup>Ecole des Mines de Saint Etienne, centre SPIN, Laboratoire Georges Friedel.

158, cours Fauriel. 42000 Saint Etienne (France)

### Abstract

We develop a study on the flow behavior in 2D rectangular section. Few experimental studies are carried out in the case of particles carried by a fluid. However, these flows are sharing similarities with experiences which the setting movement of particles depends solely on the gravitational force (Zuriguel 2003). However, the suspensions of the jamming phenomenon is not a systematic phenomenon. It will therefore be able to characterize the influence of parameters such as fluid-particle interfaces, dense flows, hydrodynamic forces. Here we present a model that describes the exponential distribution of blockages in the flow. Then we present an interpolation representing the evolution law of avalanche size by the ratio  $R$ .

**Keywords : Suspension, Jamming, Hydrodynamic, granular matter**

---