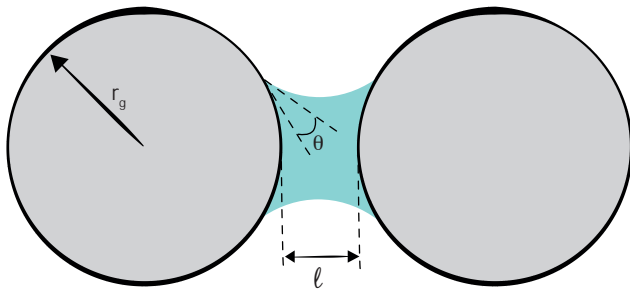


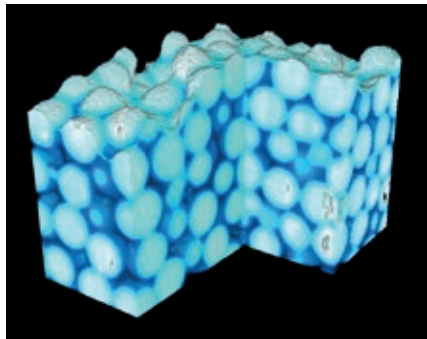
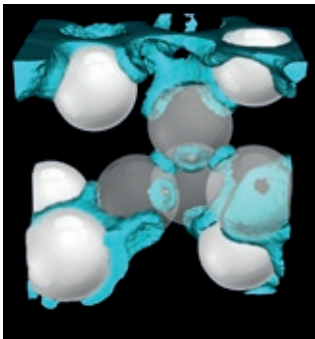
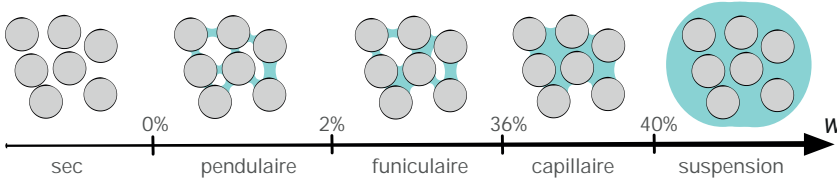


Force d'origine capillaire des ponts liquides

que l'on dépose un peu de liquide entre deux billes, il se crée un pont capillaire. L'interface entre le liquide et l'air présente une courbure dominante tournée vers l'extérieur. Cette courbure est due à la tension superficielle du liquide. Lorsque l'on ajoute plus de liquide, le pont capillaire se renforce et finit par former un pont liquide qui maintient les billes ensemble. Si on continue d'ajouter du liquide, le pont devient de plus en plus épais et finit par former un agrégat cohésif. Ces différents états sont illustrés sur la figure 2.



pont capillaire dans l'état pendulaire



2. Les différents états d'un matériau granulaire humide statique. Les billes sont en blanc, le liquide en bleu.

«matières premières sous forme de grains, faisant des matériaux granulaires le second type de matériau le plus utilisé dans l'industrie après l'eau. Les principaux domaines d'activités concernés sont l'extraction (minière, pétrolière, civile), l'agro-alimentaire, les industries chimique et pharmaceutique, mais que l'industrie verrière utilise des matières premières granulaires. Comment pouvons-nous définir les interactions entre des grains secs et des grains déjà humides pour mieux comprendre les mélanges entre des grains et de l'eau ? À ce jour, nous allons commencer par rappeler des éléments de la physique des milieux granulaires humides statiques, notamment les forces de cohésion entre grains. Nous pourrions alors ensuite discuter des deux cas limites : érosion d'un agrégat humide ou des grains secs en écoulement peuvent arracher des grains collés à l'agrégat par des ponts capillaires. Puis nous illustrerons l'autre extrême où des grains secs peuvent adhérer à un agrégat humide et faire croître sa taille. Ces deux situations illustrent la complexité de la physique des granulaires humides.

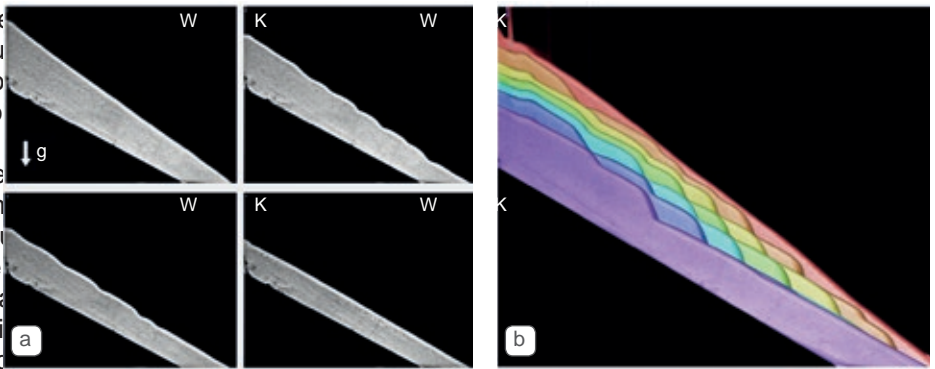
Matériaux granulaires humides et forces capillaires

Quand on parle de grains de sable humides, on pense souvent aux châteaux de sable que l'on peut réaliser étant enfant sur le bord de la plage [2]. Ces exemples de structure démontrent les effets spectaculaires de la cohésion capillaire induite par le liquide, comme illustré sur la figure 1 (p. 17). L'apport d'une faible quantité de liquide est suffisant pour changer profondément les propriétés mécaniques du matériau granulaire [3]. Ce comportement cohésif résulte de la formation de ponts liquides entre les grains (voir encadré 1).

Si les interactions capillaires sont faciles à décrire à l'échelle de deux grains, leur prise en compte dans un tas de grains est plus délicate. En effet, la répartition spatiale hétérogène du liquide modifie localement les propriétés mécaniques du matériau granulaire humide [5]. À l'échelle des grains, plusieurs états ont été historiquement définis (il y a un siècle, en 1917, par Versluys), en référence à la conformation géométrique que le liquide adopte en fonction de la fraction liquide  $W$ , c'est-à-



dire le volume de liquide divisé par le volume total. Les différents états d'un matériau granulaire humide statique sont représentés sur la figure 2a par ordre croissant de fraction liquide l'état *sec* (sans liquide) est suivi de l'état *pendulaire* où le liquide, suspendu entre deux grains, forme des ponts capillaires indépendants. Ensuite vient l'état *funiculaire* (car le liquide forme des « cordons »), lorsque les ponts capillaires commencent à fusionner et le liquide relie plusieurs grains entre eux, formant ainsi des



chapelets de pores complètement saturés et connectés. Puis l'état *capillaire* (nommé ainsi car l'eau envahit les pores des roches « ns comme des cheveux ») intervient lorsque l'empilement granulaire est quasiment saturé (sauf en périphérie), mais reste cohésif en raison de la dépression capillaire appliquée par les ménisques liquides à l'interface liquide/air. En fin de compte, le milieu est

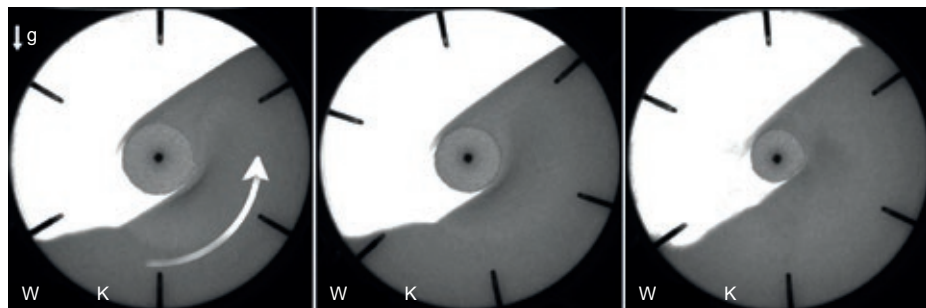
sous forme de *suspension* lorsque les grains sont complètement immergés dans un excès de liquide. Des exemples de la morphologie d'un échantillon partiellement saturé de liquide au niveau des interfaces. Dans cet article nous allons considérer le régime *pendulaire* où le matériau peut être érodé par des grains en écoulement, et le régime *capillaire* où de nouveaux grains peuvent être capturés par accrétion.

La majorité des études s'est intéressée aux propriétés mécaniques des matériaux granulaires humides statiques dans lesquels le liquide est réparti spatialement de manière uniforme. Néanmoins pour réussir à percer les mystères de la transition d'un milieu granulaire sec à un

matériau humide au cours d'un mélange des mécanismes et la dynamique d'interaction entre des grains et de liquide au niveau des interfaces. Dans la suite, nous présentons des résultats obtenus par microtomographie par rayons X, sont représentés sur les figures 2b et 2c. Dans ces deux cas limites de la fraction liquide nous menant à l'érosion ou à l'accrétion d'un milieu granulaire humide.

la morphologie des sols à la suite d'un éboulement ou d'une coulée pyroclastique (écoulement volcanique très violent, mélange de gaz et de particules voire de rochers, dévalant les ancres à grande vitesse). Dans son principe, l'érosion par l'écoulement granulaire ressemble grandement à l'érosion des sédiments au fond des rivières, où la force exercée par le courant sur une particule du lit permet de vaincre son poids apparent et ainsi d'éroder le fond. La principale différence, ici, réside dans la nature de la force imposée par l'écoulement sur le matériau cohésif humide. A n de comprendre ce mécanisme d'érosion, du matériau granulaire humide homogène et cohésif) est tout d'abord préparé par ajout contrôlé d'un liquide (eau ou huile), puis il est soumis à un écoulement granulaire sec. Pour cela nous utilisons deux configurations. La première est un cylindre tournant d'axe horizontal, de faible épaisseur, qui permet de former un agrégat humide cylindrique en son centre et d'entraîner les grains secs par rotation à n qu'ils s'écoulent par-dessus l'agrégat ( g. 3). Cet écoulement granulaire arrache des grains à l'agrégat humide et ainsi l'érode. En pratique, le matériau ne s'érode que si l'énergie transférée par les chocs est suffisante pour casser les ponts capillaires et emporter le grain.

### URVLRQ FVVHU OHV SRQWV capillaires

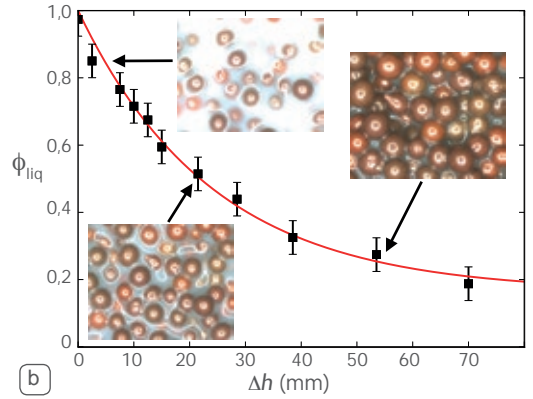
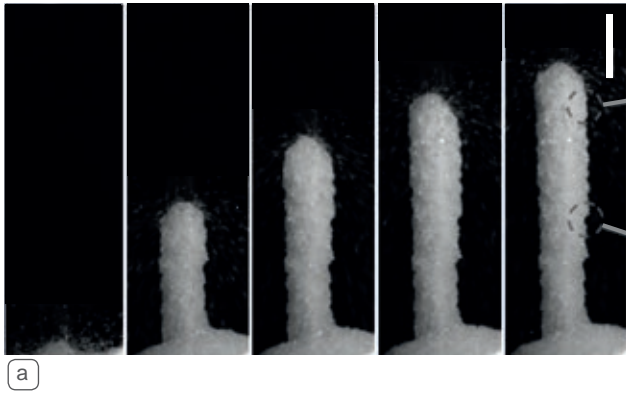


3. Exemple d'érosion d'un agrégat humide de billes de verre (disque central clair), retenu au centre d'un tambour tournant d'axe horizontal.

l'érosion des sédiments au fond des rivières, où la force exercée par le courant sur une particule du lit permet de vaincre son poids apparent et ainsi d'éroder le fond. La principale différence, ici, réside dans la nature de la force imposée par l'écoulement sur le matériau cohésif humide. A n de comprendre ce mécanisme d'érosion, du matériau granulaire humide homogène et cohésif) est tout d'abord préparé par ajout contrôlé d'un liquide (eau ou huile), puis il est soumis à un écoulement granulaire sec. Pour cela nous utilisons deux configurations. La première est un cylindre tournant d'axe horizontal, de faible épaisseur, qui permet de former un agrégat humide cylindrique en son centre et d'entraîner les grains secs par rotation à n qu'ils s'écoulent par-dessus l'agrégat ( g. 3). Cet écoulement granulaire arrache des grains à l'agrégat humide et ainsi l'érode. En pratique, le matériau ne s'érode que si l'énergie transférée par les chocs est suffisante pour casser les ponts capillaires et emporter le grain.

Nous avons mesuré la vitesse d'érosion des agrégats humides en fonction des paramètres du liquide [6]. Une diminution de la vitesse d'érosion est observée pour une augmentation de la fraction liquide et de la viscosité du uide.





5. Croissance d'une tour granulaire sur du sable humide.

D 3KRWRJUDSKLHV GH OD FURLVVDQFH GH OD WRXU SRXU GHV ELOOHV GH YHUUH GH /D EDUUH G5«FKHOOH HVW GH FP , GURLWHb VFK«PDV LOOXVWUDQW OD GLPLQXWLRQ G avec la hauteur.

E «YROXWLRQ GH OD IUDFWLRQ VXUIDFLTXH GH OLTXLGH ç OD VXUIDFH G5XQ PDW«ULDX J SURSRUWLRQQHOOH ç OD KDXWHXU oK GH OD VXUIDFH DX GHVVXV GX U«VHUYRLU GH OLTX

>>>

Une seconde série d'expériences d'érosion a été réalisée à la surface pentue (g. 4, p. 19). Cette seconde con guratoncontact, dont certaines dépassent la foitintermédiaire de l'inertie des grains secs, permet en effet de mieux contrôler les ponts capillaires, permet de modéliser la vitesse d'écoulement des grains secs et la vitesse d'érosion. La deuxième sur plus en phase avec la pente locale du tas et le tas humide. La vitesse d'érosion (g. 4), analogue à la formation des cas- l'interface augmente alors avec la densité des grains qui s'écoulent et avec le vitesse. Cette expérience d'érosion a pas plus prononcée pour les fortes pentes ailleurs mis en évidence, à haute vitesse d'écoulement, une déstabilisation de l'écoulement, donc la pression, et la forme de l'interface initialement plane de friction sont les plus faibles, au contraite vitesse des grains secs en écoulement. (g. 4).

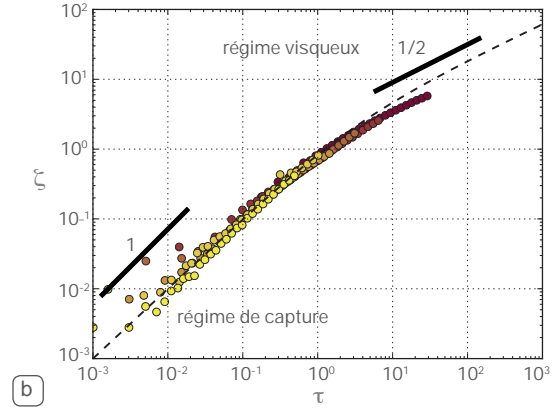
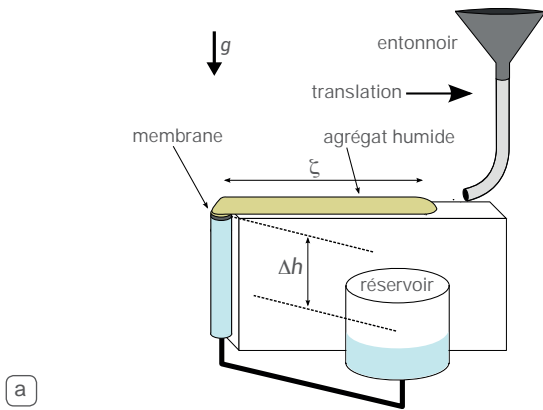
Pour interpréter ces résultats, on s'intéresse à l'érosion et souligne le rôle des forces dans un premier temps à l'impact. L'énergie cinétique des grains augmente fortement, en nous plaçant dans un régime capillaire. Une fraction de liquide  $W$  plus importante permet d'augmenter le volume des ponts capillaires (et leur nombre en allongeant ainsi leur longueur de rupture (voir l'encadré 1), et la viscosité module le temps nécessaire pour rompre un lien.

( Q F D G U «

**Forces moyennes et modélisation probabiliste de l'érosion**

La modélisation de l'effet des grains secs en écoulement est plus subtile. Premièrement, la densité des grains joue deux rôles : elle agit sur le poids de la couche en écoulement, donc sur la force de friction à l'interface, et elle intervient aussi dans la force d'impact, collisionnelle, des grains sur l'interface. Or, en considérant les caractéristiques moyennes de l'écoulement, l'évaluation des forces d'érosion issues de ces phénomènes donne des valeurs 10 à 100 fois inférieures à la force des forces qui dépassent le seuil donné par la force du pont capillaire  $F_{cap}$ .





&URLVVDQFH G5DJU«JDWV JUDQXODLUHV KXPLGHV KRUL]RQWDX[  
 D 6FK«PD GX GLVSRVLWLI H[S«ULPHQWDO SHUPHWWDQW GH FU«HU GHV DJU«JDWV JUDQXODLUHV  
 E &RXUEH JOREDOH SU«GLVDQW O5«YRO«WLSXQ GH U«D DOR Q U«D«X«D DLGULP H«WLRU«Q KRUL]R  
 adimensionné τ /HV ORLV G5«FKHOOH FRUUHVSRQGQDQW DX[ GHX[ U«JLPHV OLPLWHV VRQW FRPPH  
 FODLU LQGLTXH O5DXJPHQWDWLRQ GH OD G«SUHVVLQR K\GURVWDWLTXH ΔK ϕ PP > @

## \$FFU « WLRQ FDSWXUH des grains par le liquide

avant que le sucre ne se désagrège visqueuse qui le freine et à la force capillaire  
 Cette situation a été décrite dans le cas de la rétention.

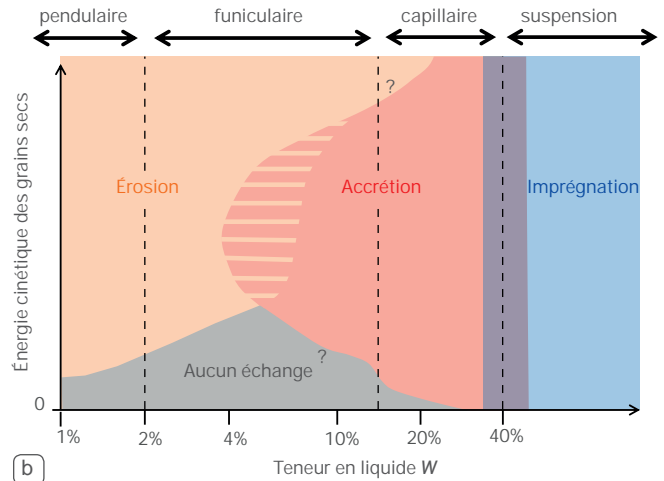
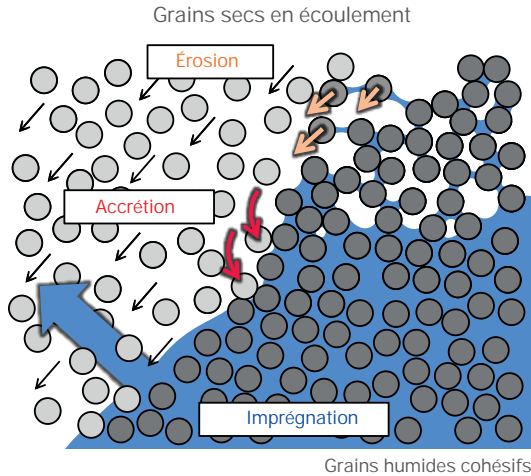
Pour visualiser l'accrétion à l'échelle de la tour granulaire, il suffit de verser du milieu poreux. Physiquement, le liquide agrégat ont permis de montrer que, sous sable sec sur du sable humide. Si la queue pénètre dans les pores sous l'effet de la dépression hydrostatique, la tite de liquide contenue dans le substrat de surface et de la dépression fraction surfacique de liquide diminue humide est suffisamment importante capillaire due à la courbure de l'interface exponentiellement avec la hauteur, comme (régime capillaire), on voit croître un liquide/air. Pour des hauteurs assez faibles, présenté sur la figure 5b, et de manière structure verticale là où un simple tas de l'influence du poids de la colonne est similaire à l'évolution de la probabilité de grains conique se serait formé si le substrat humide dans le poreux est encore négligeable capture obtenue expérimentalement.

La croissance d'une tour granulaire est visible sur la figure 5a et le liquide ralentit proportionnellement à la racine carrée du temps à cause de la dépression hydrostatique, des expériences de croissance stable. Cette expérience, simple à mettre en œuvre, démontre le processus d'accrétion par la longueur traversée par le liquide.

Le dispositif expérimental présenté sur la figure 6a. L'avantage de cette configuration est que la dynamique de croissance est contrôlée par la dépression hydrostatique, et progresse. Le liquide peut se propager ainsi, considérer uniquement l'écoulement dans l'air de liquide disponible pour l'agrégat peut croître en captant des grains, le liquide dans le milieu poreux n'est pas capable de capturer des grains, est constante pour on parle alors d'accrétion granulaire. Mais sans pour décrire ces phénomènes, chaque expérience effectuée à Δh fixé.

Deux régimes de croissance d'agrégats granulaires, du fait de la dépression hydrostatique par l'écoulement visqueux dans la structure poreuse à faible dépression (donnant une loi de croissance horizontale en  $\tau^{1/2}$ ) et (ii) plus en plus rétractés, comme schématisé sur la figure 5a, et il devient donc difficile de capturer de nouveaux grains à plus grande dépression (engendrant une loi linéaire en temps car la dépression hydrostatique, donc la fraction surfacique de liquide, est constante). Toutes les dynamiques peuvent être reproduites grâce à ce double mécanisme, et l'évolution des tours horizontales est représentée sur la figure 6b où les résultats sont tracés en





7. Vue synthétique des interactions entre un agrégat humide et un écoulement granulaire sec.

D 6FK«PD GHV GLII«UHQWV SK«QRP<sup>a</sup>QHV G5«FKDQJHV HQUWH XQH SKDVH JUDQXODLUH V<sup>a</sup>P  
 E 'LDJUDPPH GH SKDVH TXDOLWDWLI SU«VHQWDQW OHV IURQWL<sup>a</sup>UHV DWWHQGXHV HW IRQ  
 GDQV O5DJU«JDW KXPLGH /HV SRLQWV G5LQWHUURJDWLRQ LOOXVUHQW OHV JRQHV G5RP

>>>

fonction d'une longueur  $\zeta$  et d'un temps  $\tau$ , où les différentes interactions d'adimensionné avec les différents paramètres granulaires humides et secs en mètres du problème, tels que les propriétés de transport liquide dans la colonne (la porosité de l'agrégat, la viscosité), le débit des grains impactant, ainsi que la valeur de la probabilité de capture à dépression nulle [10]. Bien que nous ayons identifié le principe du mécanisme, différents paramètres comme les propriétés physiques élémentaires d'échange de grains entre le liquide, des grains ou du jet, modifient les phases, mais l'influence précise des sources de dissipation lors de l'impact de la croissance d'agrégats humides de manière non triviale. Par exemple, que l'effet de la viscosité sur le transport du liquide est modélisé, son rôle dans la capture est ambigu. Une grande viscosité freine davantage le grain, favorisant une capture, mais rigide et aussi la structure granulaire lors de l'impact, favorisant le rebond. Il reste ainsi à modéliser comment ces propriétés physiques modifient directement la probabilité de capturer des grains.

### Vers une prédiction

Nos études ont montré que selon la répartition de liquide contenu dans un milieu granulaire hétérogène, des grains secs en écoulement peuvent soit éroder des agrégats humides dans le régime pendulaire soit au contraire être capturés pour de grandes fractions liquides (g. 7), les faisant ainsi croître. Il en résulte une situation typique des mélangeurs réels, décrite sur la

### Références

*Les milieux granulaires : Entre fluide et solide* ('3 VFLHQFH  
 ' %RQQ 8+RZ WR FRQVWUXFV  
 sandcastle", *Scientific reports*  
 +HUPLQJKDXV 8'QDPLFV R  
 JUDQXODU PDWWHU9 *Advances in*  
 \* 'H \*HQQHV ) %URFKDUG  
 HW ' 4X«U« *Capillarity and Wetting Phenomena: Drops, Bubbles, Pearls, Waves* 6SULQJHU  
 6FKHHO 5 6HHPDQQ 0 %U  
 'L OLFKLHO \$ 6KHSSDUG %  
 HW 6 b+HUPLQJKDXV 8ORUSKR  
 WR ZHW JUDQXODU SLOH VWD  
*Nature Materials*, 7  
 /HIHEYUH HW 3 -RS 8(URVL  
 RID ZHW JUDQXODU PHGLXP9  
*Review E*, 88  
 /HIHEYUH \$ OHUFHURQ HW  
 8,QWHUIDFLDO ,QVDELOLW\  
 (URV'LPHQ  
 3DFKHFR 9DJTXHJ ) ORUHDX  
 1 9DQGHZDOOH HW 6 'RUERO  
 86FXOSWLQJ V DQGFVWQH V J  
 VHOI DVVHPEOHG VDQG WRZH  
*Physical Review E*,  
 :DVKEXUQ 87KH G\QDPLFV R  
 flow", *Physical review*, 17  
 \* 6DLQLJLHU \$ 6DXUHW HW 3  
 8\$FFUHWLRQ G\QDPLFV RQ ZH  
*materials*", *Physical Review Letters*,  
 118