



# LES FLUIDES COMPLEXES

**P. Coussot**  
**Laboratoire Navier**

UNIVERSITÉ —  
— PARIS-EST

# 1. SOLIDES



Pierre



Métal

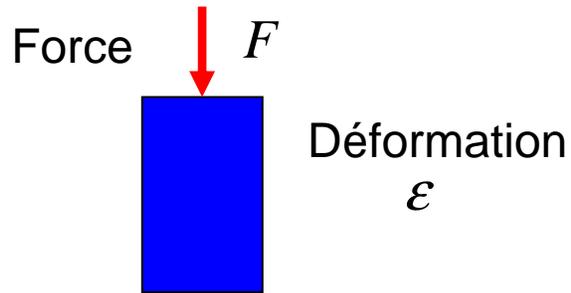
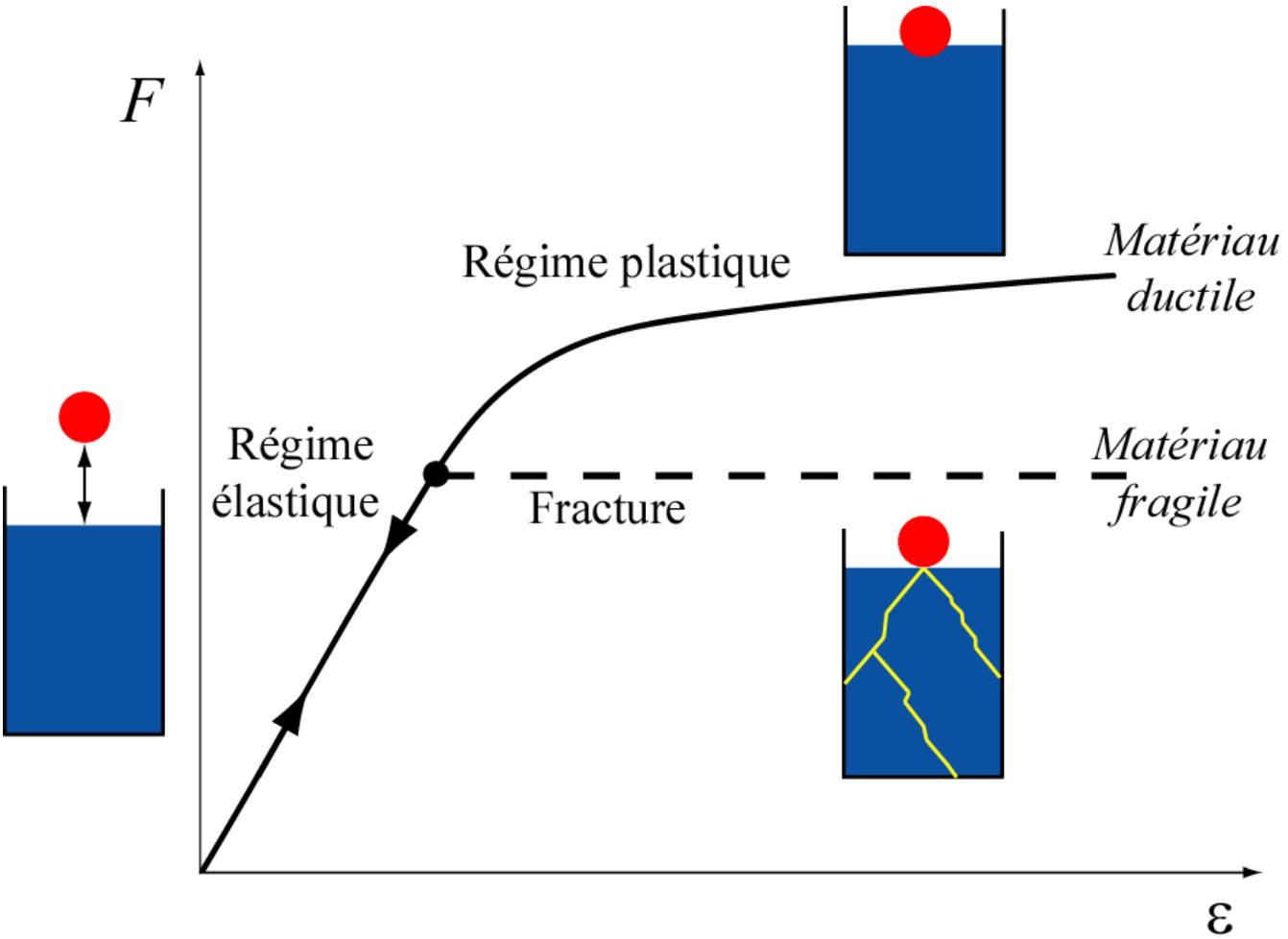


Bois



Polymère

# Comportement apparent



Elasticité :  $F = kf(\epsilon)$  + réversible

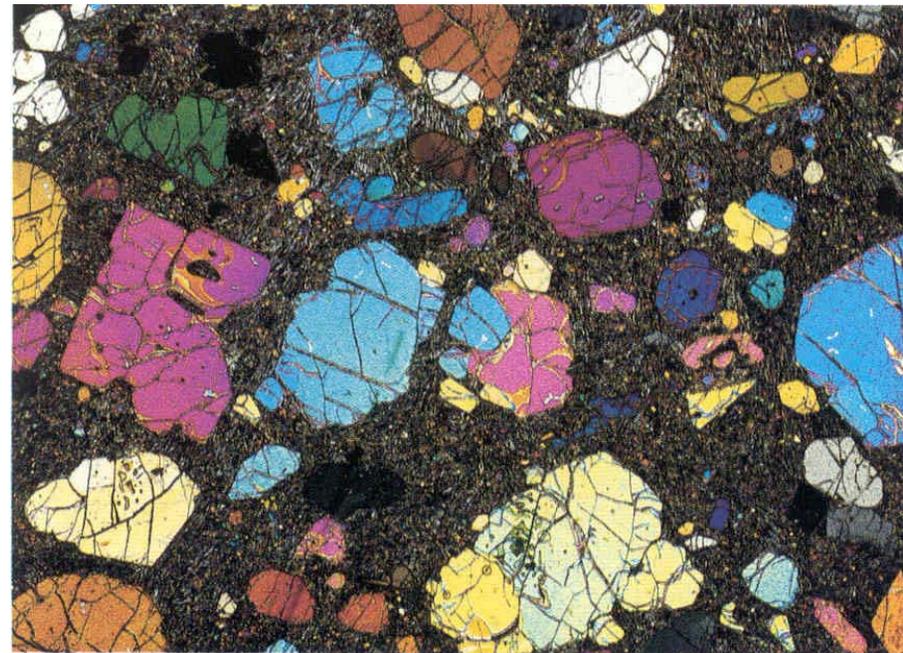
« Ecoulement »  $F > F_c$

## Structure d'un solide ?

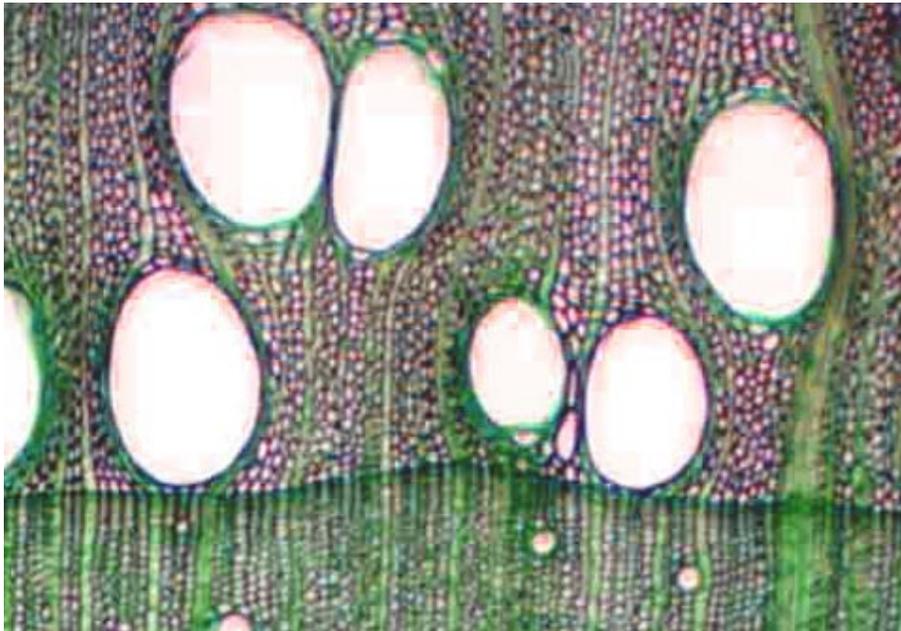
**Béton**



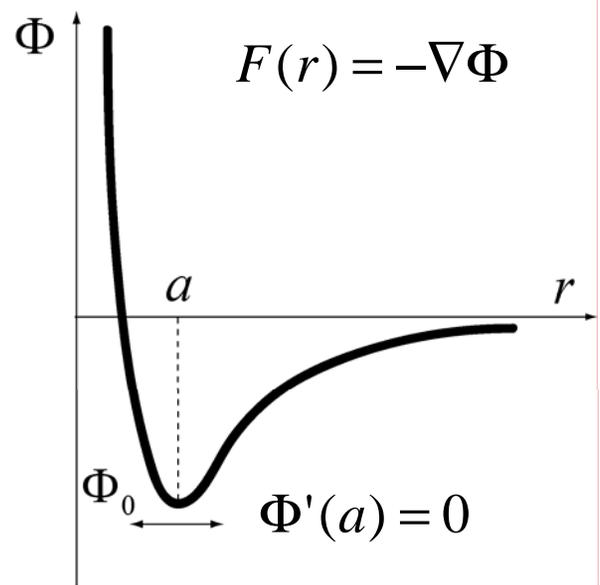
**Basalte**



**Bois**



# Rhéophysique des solides

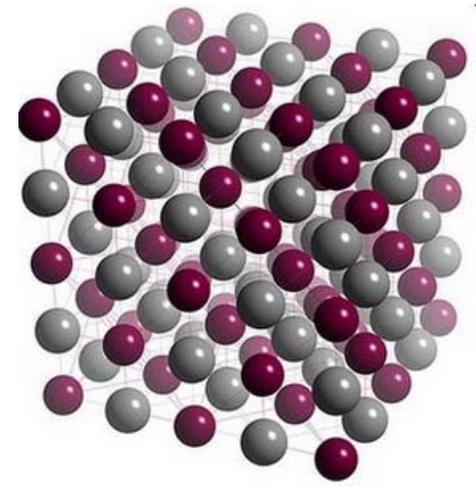


Energie potentielle d'interaction entre deux particules voisines

Ex.: 
$$\Phi_1(r) = -\frac{A}{r^n} + \frac{B}{r^m}$$

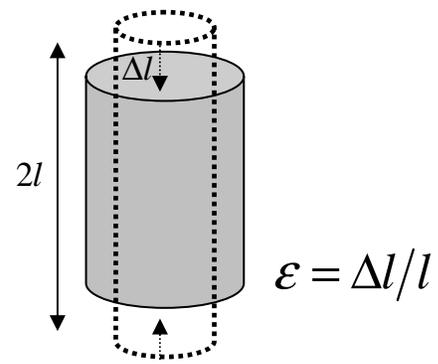
- Solide ionique:  $n=1, m=9$
- Solid de van der Waals:  $n=6, m=12$
- Métale monovalent:  $n=1, m=2$

Hyp.: Solide cristallin



$$F(x) \approx x\Phi''(a) \quad x = r - a$$

**Comportement élastique linéaire**  
pour de petites déformations



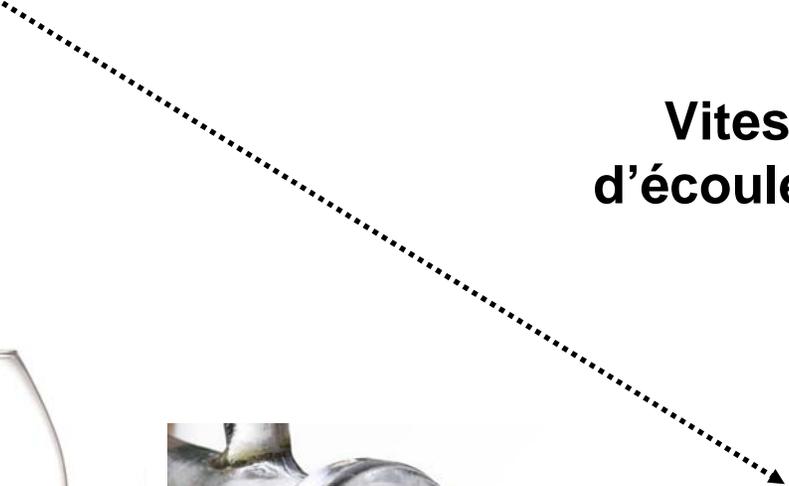
**Module d'Young:**

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{3\Phi''(a)}{2a}$$

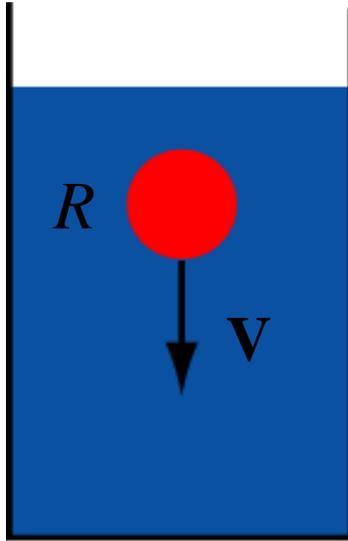
# 2. LIQUIDES SIMPLES



Vitesse d'écoulement



# Déplacement d'un objet sous l'action d'une force à travers un liquide simple



Mouvement stationnaire à travers le fluide (macroscopiquement) au repos

Force à appliquer sur l'objet :  $\mathbf{F}_D$

Dépend de la forme de l'objet

Traînée visqueuse :

$$\mathbf{F}_D = -(\overbrace{6\pi\mu})R\mathbf{V}$$

Paramètre dépendant du liquide :

**VISCOSITE**

# Mesure de la viscosité: rhéométrie

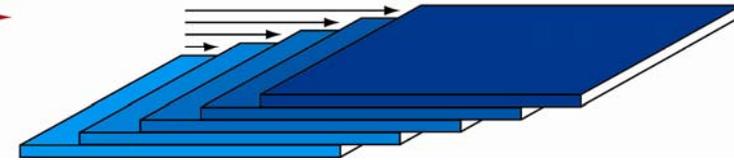
Hypothèse classique : glissement homogène de couches identiques (Newton !)

$$\text{Viscosité} = \alpha \frac{F}{V} \quad \alpha = H/S$$



Rhéomètre

$H$



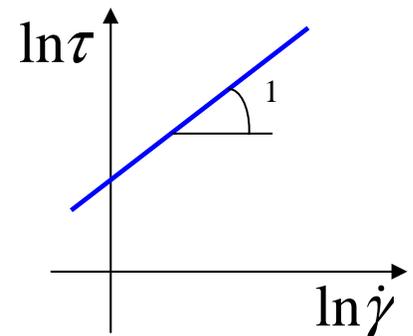
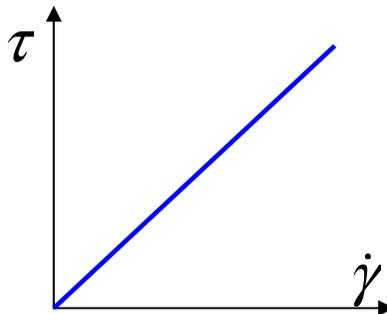
Contrainte tangentielle :  $\tau = F/S$

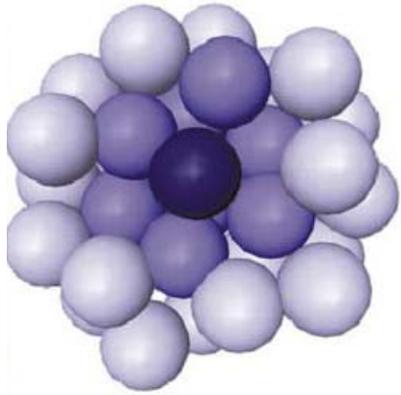
Gradient de vitesse :  $\dot{\gamma} = V/H$

Comportement newtonien

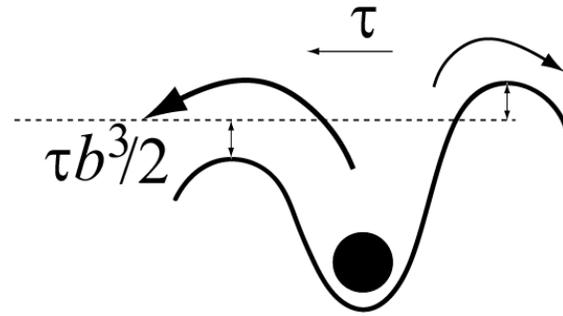
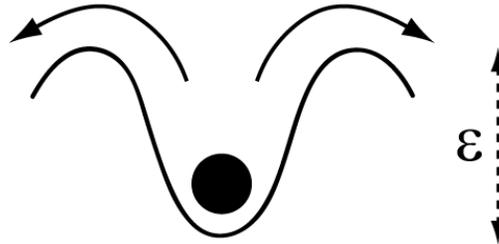
$$\tau = \mu \dot{\gamma}$$

$\mu$  Viscosité (en Pa.s)





**Attractions de Van der Waals  
+ Agitation thermique**



Fréquence de sauts:  $f_0 = C \exp\left(-\frac{\varepsilon}{k_B T}\right)$

Mouvement relatif sous l'effet d'une contrainte

$$f = C \left[ \exp\left(-\frac{(\varepsilon - \tau b^3/2)}{k_B T}\right) - \exp\left(-\frac{(\varepsilon + \tau b^3/2)}{k_B T}\right) \right]$$

$$\tau b^3 \ll k_B T \Rightarrow f \propto \tau b^3 \exp\left(-\frac{\varepsilon}{k_B T}\right)$$

et  $\dot{\gamma} \propto f$

**Comportement  
newtonien**

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \propto \exp\left(\frac{\varepsilon}{k_B T}\right)$$

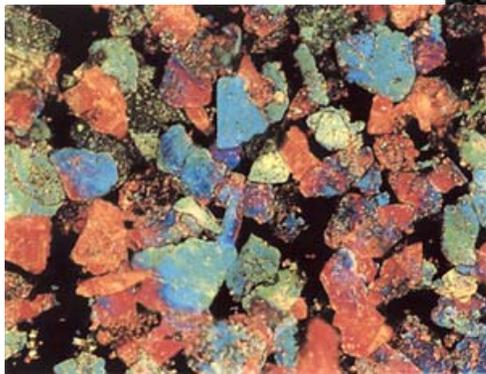
# 3. FLUIDES COMPLEXES



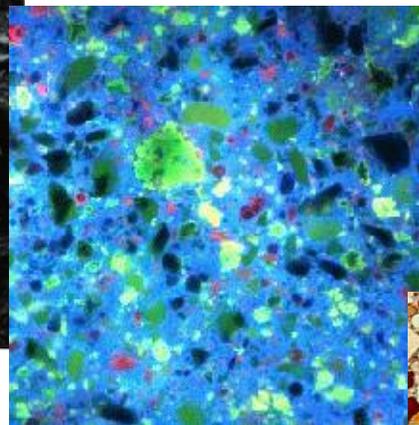
**Fluides** : Déformables à volonté

**Complexes** : Effets visqueux, élastiques, plastiques  
+ évolutions / vitesse ou temps

Peinture

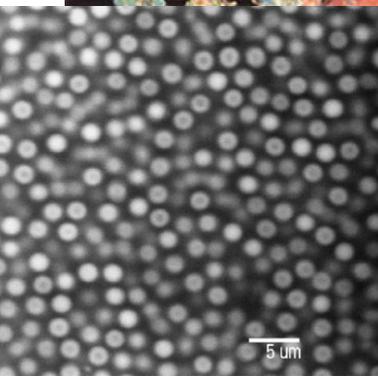


Boue

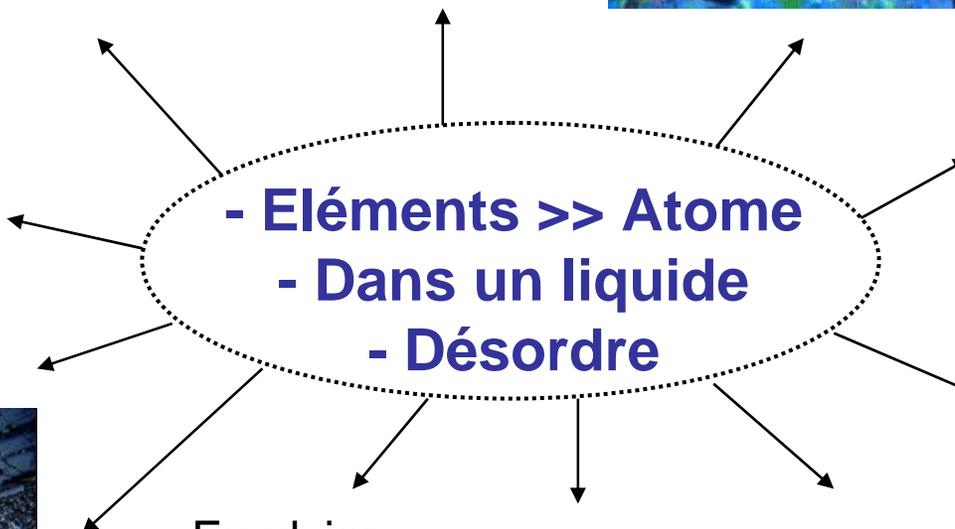


Chocolat

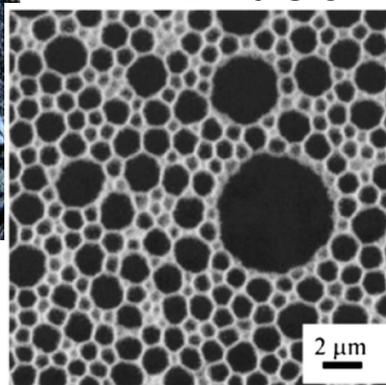
Béton frais



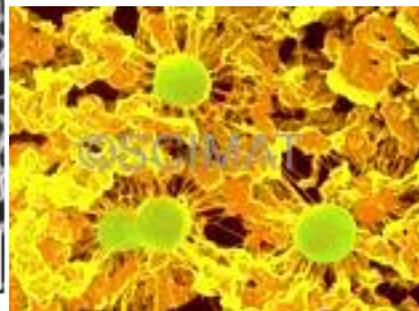
Latex



Magma



Emulsion



Fromage blanc

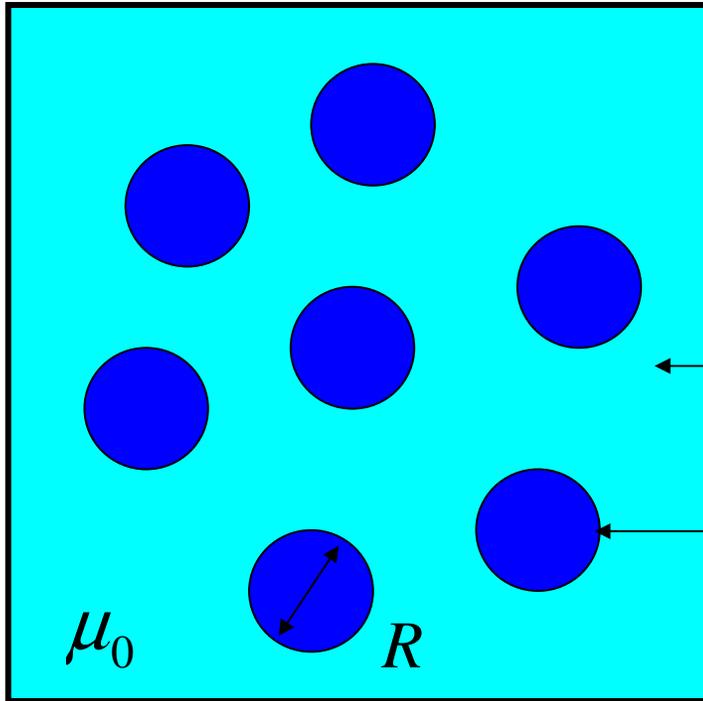


Sang



Mousse

# SUSPENSIONS



Liquide simple

Particules  
solides

Fraction volumique :  $\phi = \frac{V_{Solide}}{V_{Total}}$

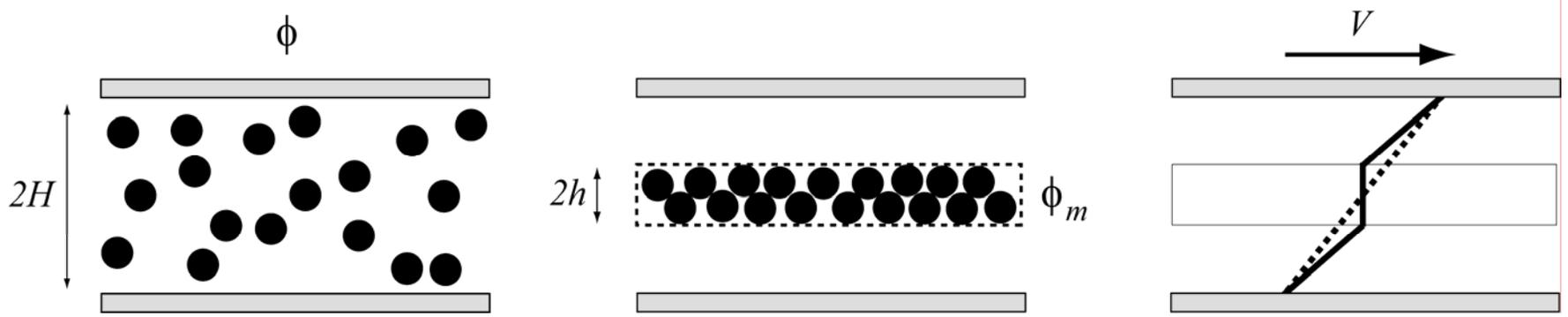
Configuration isotrope et constante =>

**Newtonien**  $\mu = \mu_0 f(\phi)$

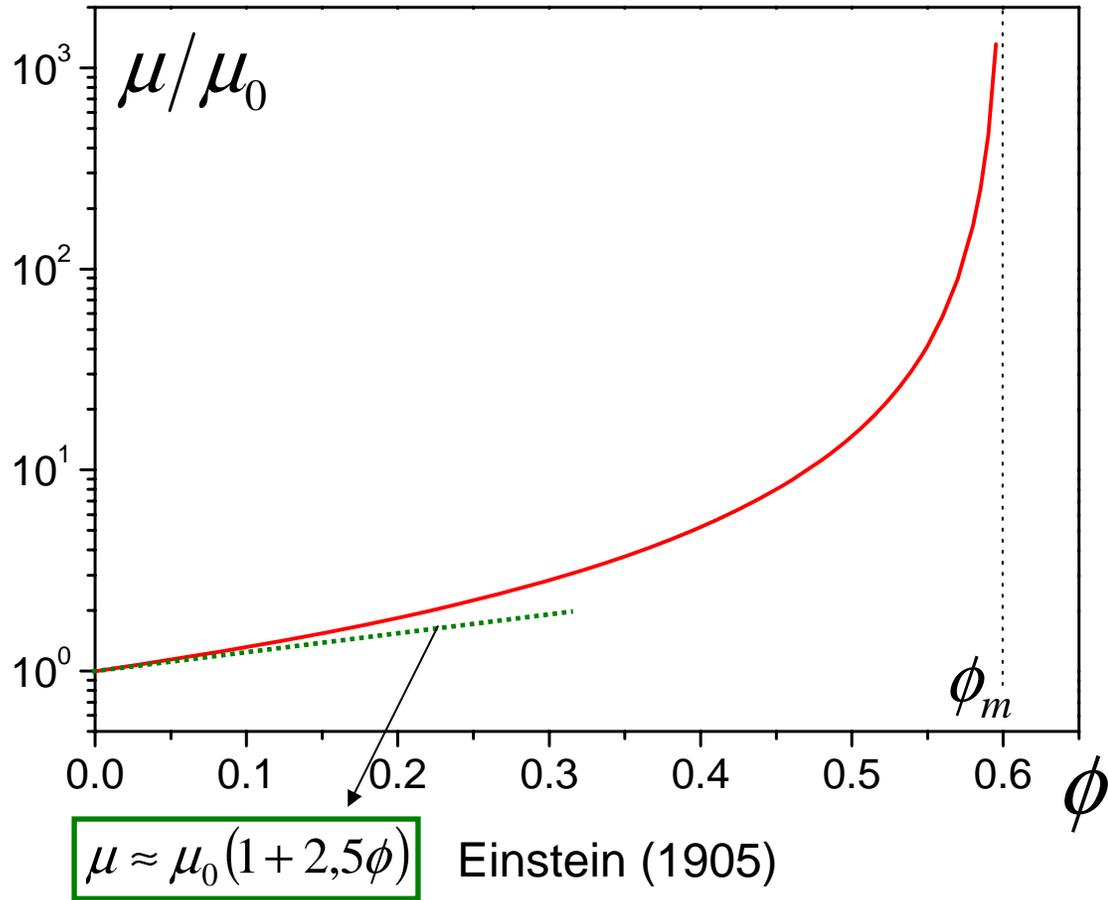
$\phi < \phi_m$

$f \nearrow$

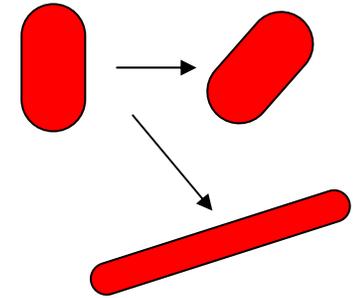
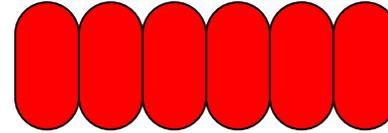
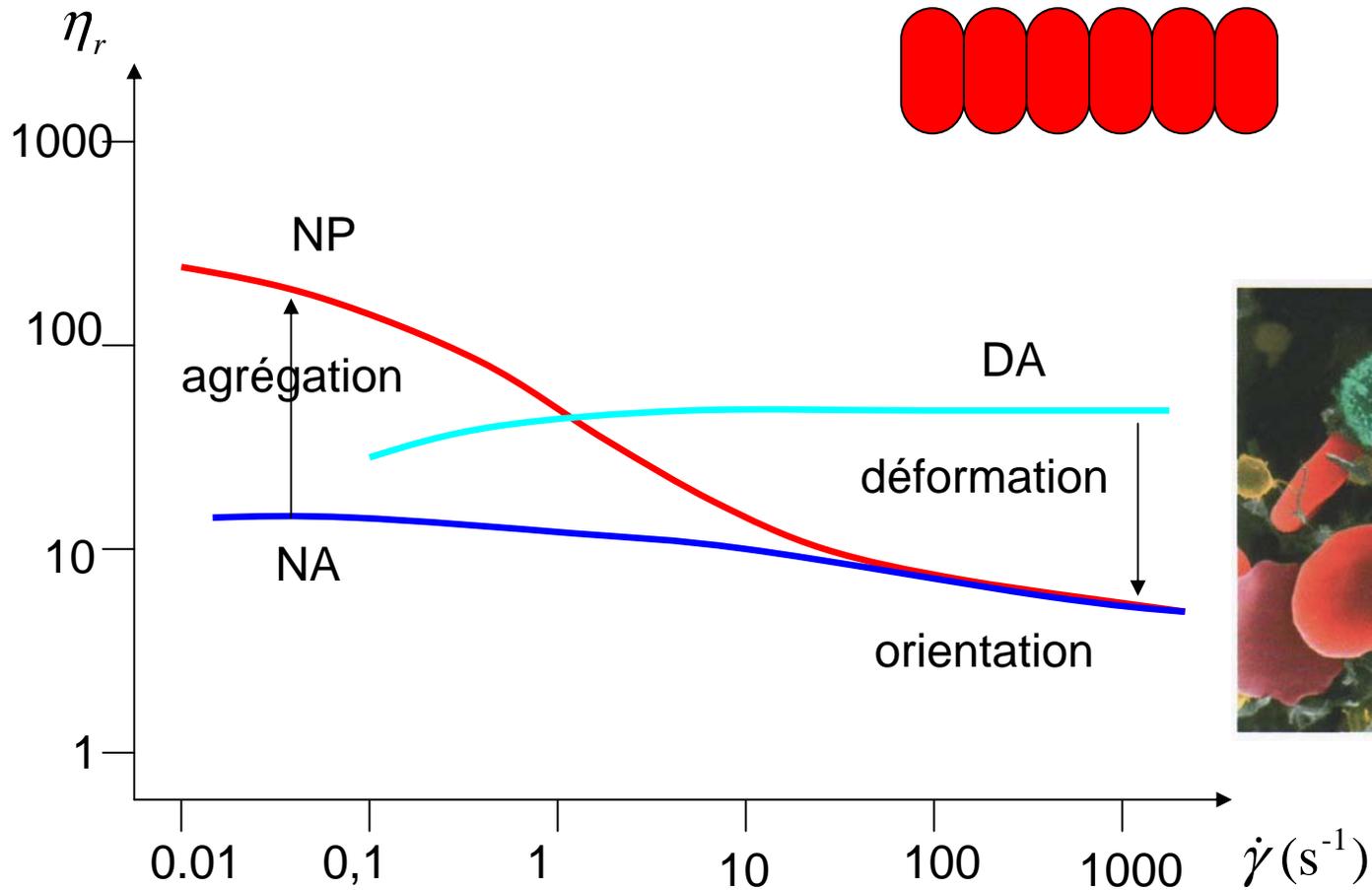
Indépendant de  $R$  !



$f ?$



- SANG** - Suspension de globules rouges (environ 45%) et blancs + plaquettes dans plasma (eau (91%) + protéines + divers éléments) newtonien (1.4 mPa.s)
- Grande capacité de déformation et d'orientation des GR
  - Aggrégation des GR en rouleaux



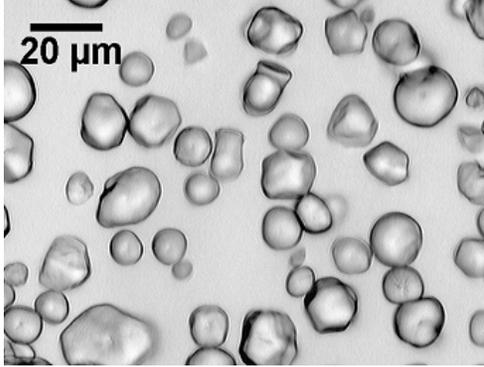
NP : Globules dans plasma normal

NA : Solution (sérum physiologique + albumine) ne permettant pas aggrégation

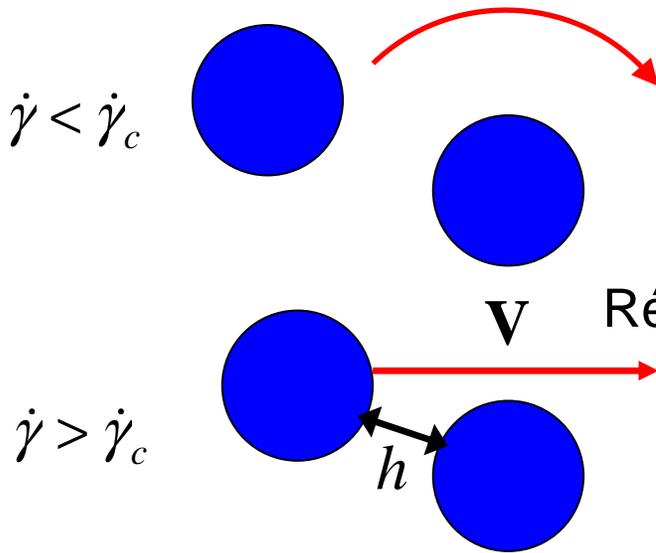
DA : Solution ne permettant ni aggrégation ni déformation (sérum + GR durcis)



# Comportement rhéoépaississant d'une suspension de maizéna



Hydroclusters



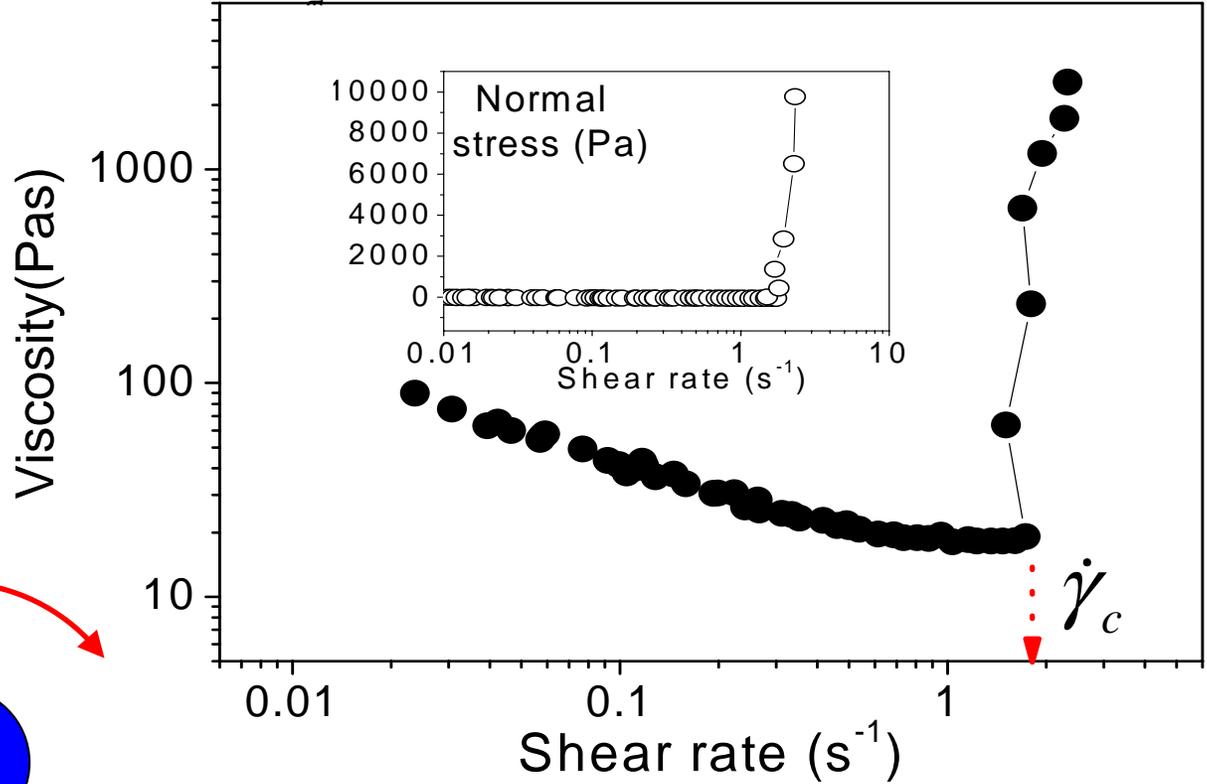
Répulsion « hydrodynamique » entre deux particules :

$$\mathbf{F}_N = -\mu_0 \left( \frac{3\pi R^2}{2h} \right) \mathbf{V}$$

$$\mathbf{F}_N \rightarrow \infty$$

$$h \rightarrow 0$$

Rampe de gradients de vitesse



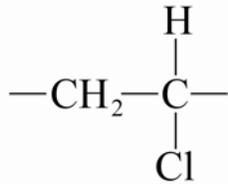
# POLYMERES

## Forme des chaînes

### Structure chimique



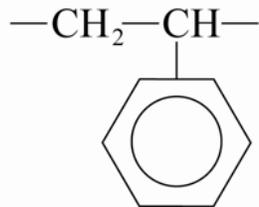
Polyéthylène



Polychlorure de  
vinyle

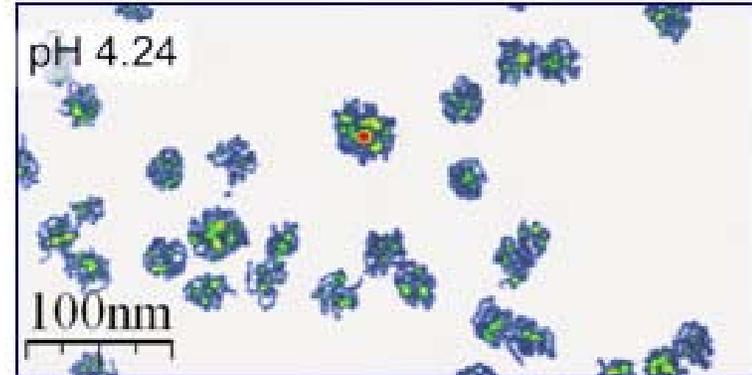
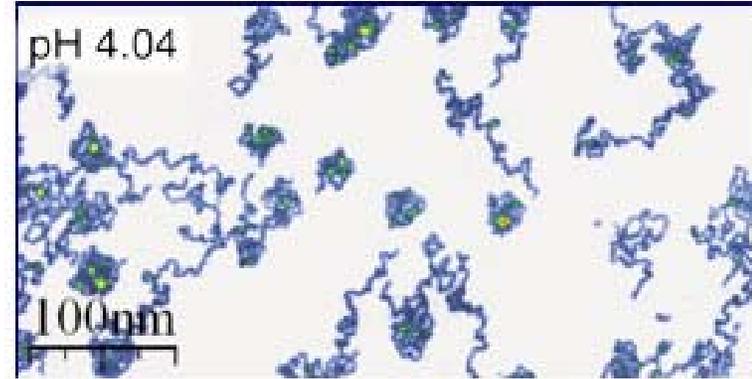
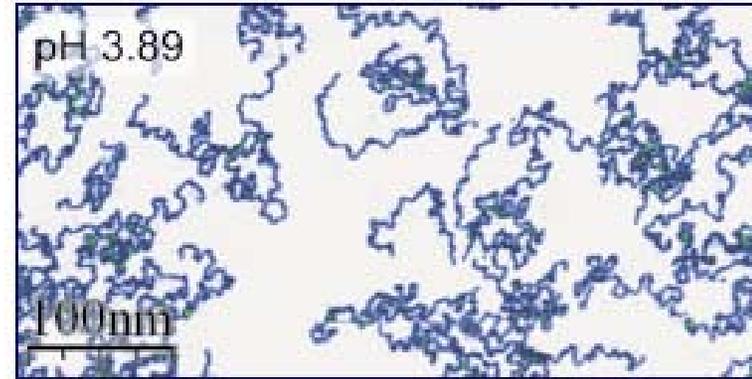


Polyamide



Polystyrène

*Vue par AFM du  
dépôt de chaînes  
sur du mica*

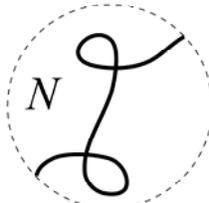


# Viscosité des solutions de polymères



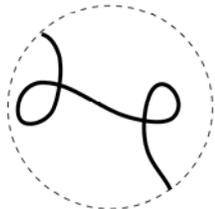
$$\Phi < \Phi_c$$

Dilué



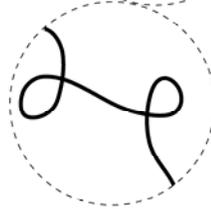
$$\Phi_c$$

Concentration critique



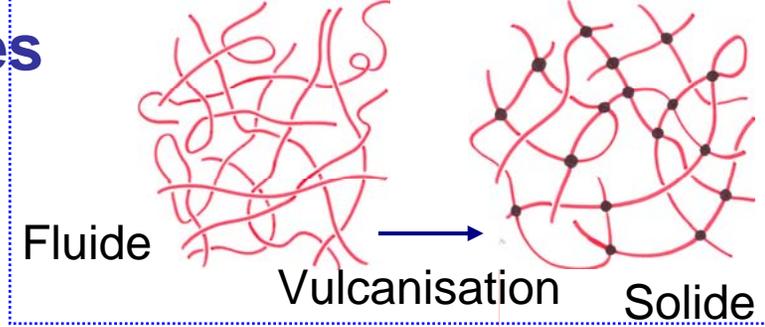
$$\Phi_c < \Phi < \Phi^+$$

Semi-dilué



$$\Phi^+ < \Phi < 1$$

Concentré

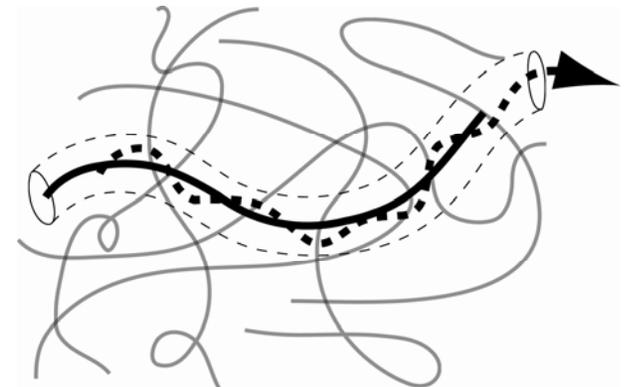


$$\mu \approx \mu_0 (1 + 2,5\phi)$$

$$\phi = \left( \frac{R_G^3}{vN} \right) \Phi$$

**Reptation**

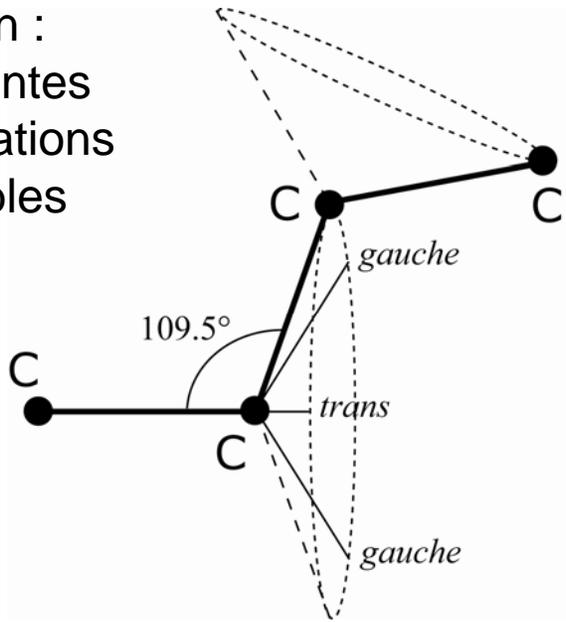
**Impact critique du solvant :  
chaîne plus ou moins expansée**



# POLYMERES

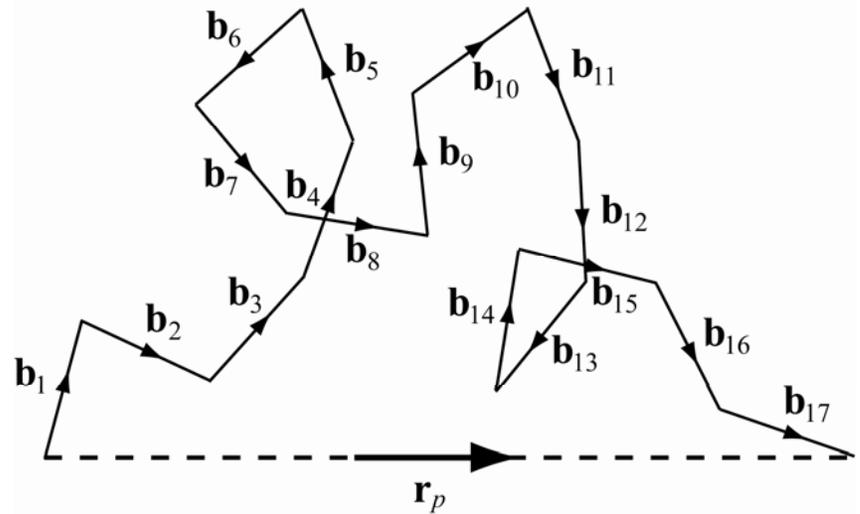


Liaison :  
différentes  
orientations  
possibles



Structure d'une chaîne :  
« Marche au hasard »  
(solvant thèta)

$N$  Segments par chaîne



Probabilité d'une longueur  
apparente donnée

$$\psi(\mathbf{r}_p) = \left( \frac{\beta}{\sqrt{\pi}} \right)^3 \exp(-\beta^2 \mathbf{r}_p^2)$$

$$\beta = \sqrt{3/2Nb^2}$$

Elongation des chaînes  
=> Perte d'entropie

$$fdr = -TdS$$

$$S = k_B \ln \psi$$

Force élastique:

$$f = 2k_B T \beta^2 r$$

Cosmétique



# Fluides à seuil (pâtes)



Systemes  
Biologiques..



Ecoulements naturels

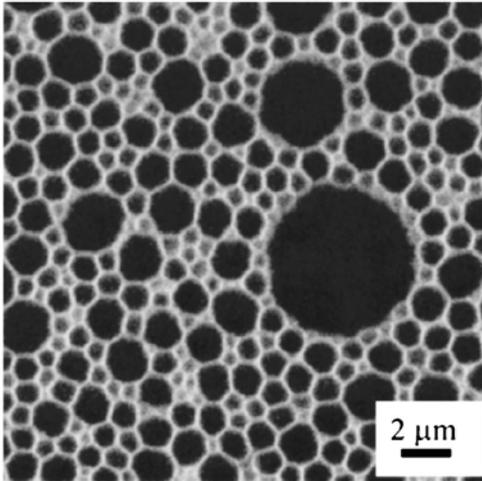


Génie civil

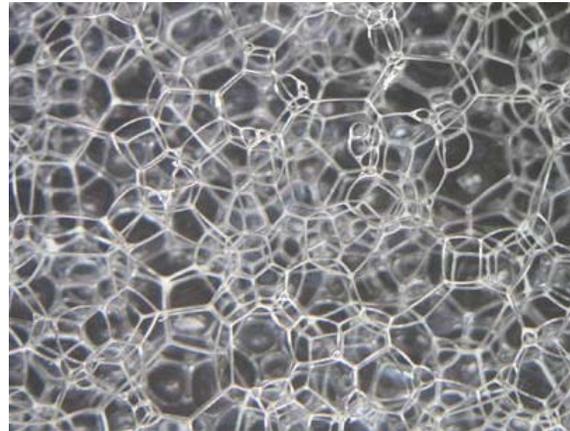


Agro-alimentaire

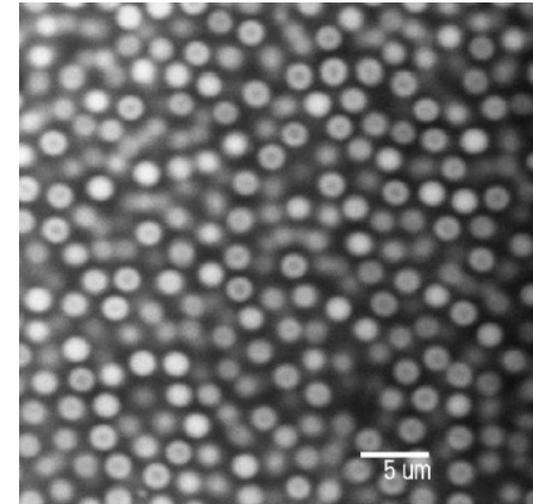
# Systemes répulsifs



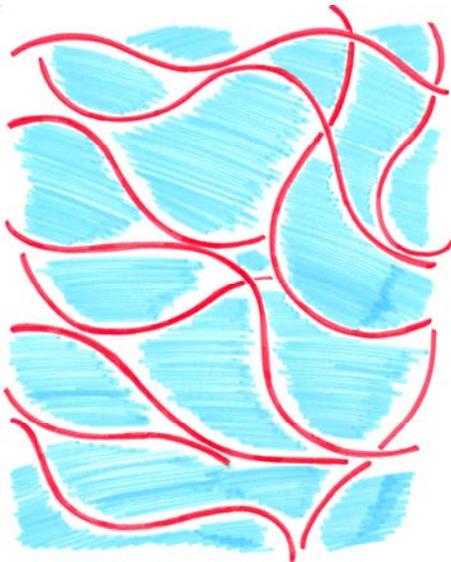
Emulsion



Mousse

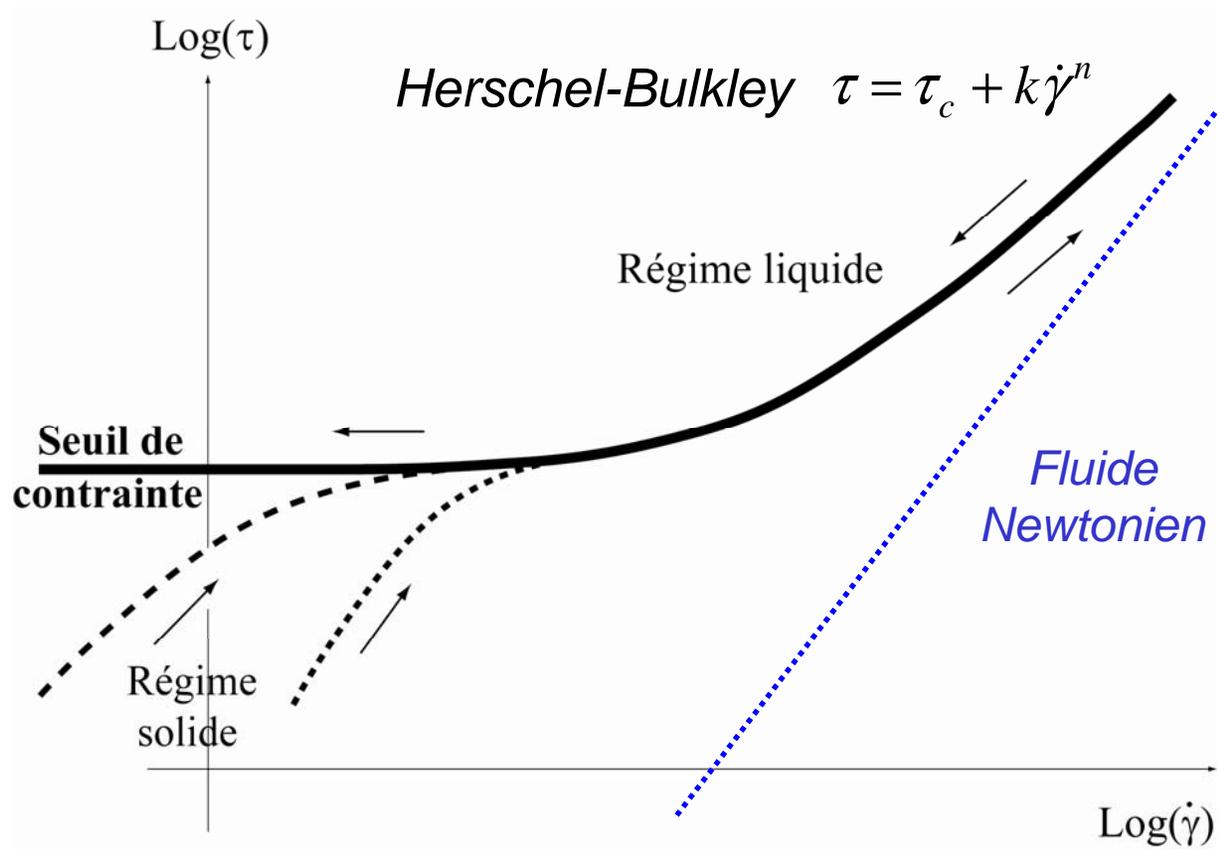
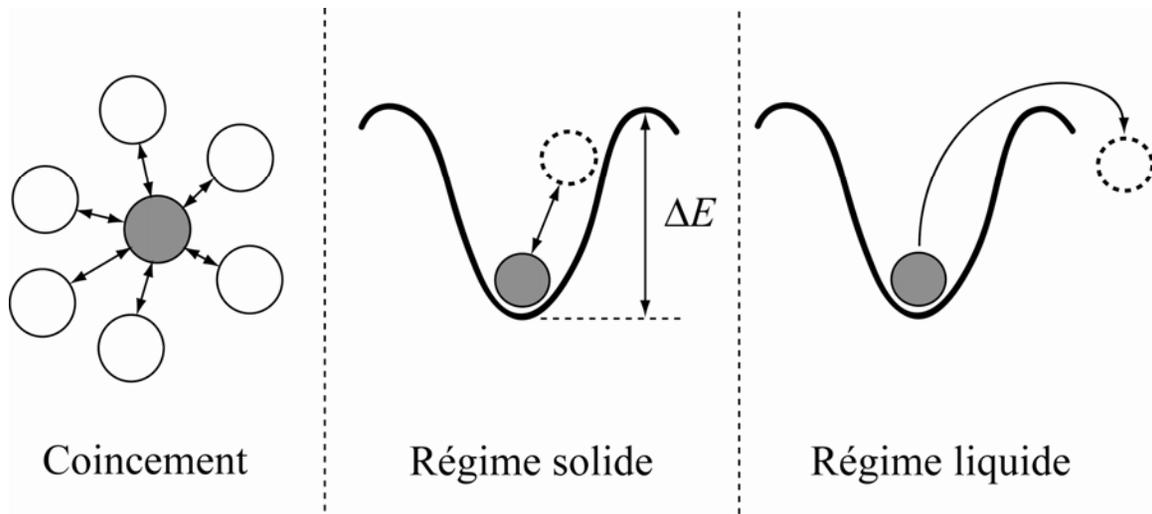


Colloïde



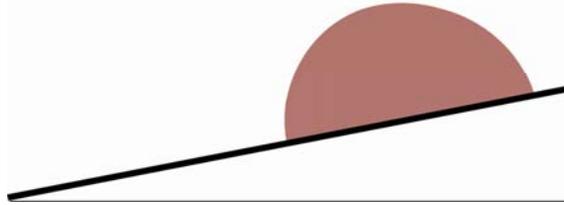
Gel physique

- Structure « coincée »
- Désordre apparemment « constant »

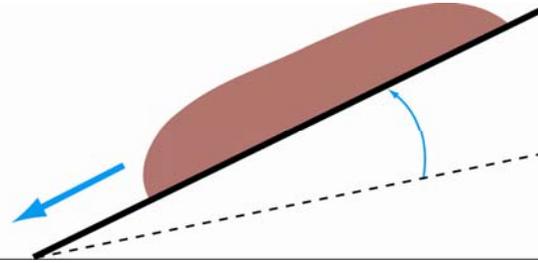


# Comportement mécanique des pâtes

**SOLIDE**



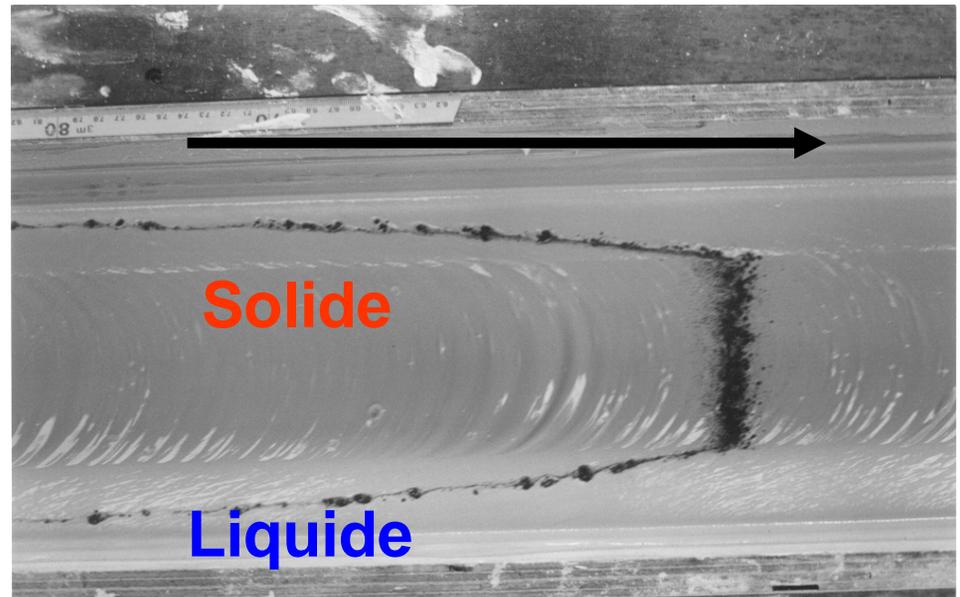
**LIQUIDE**



**Système  
« coincé »**

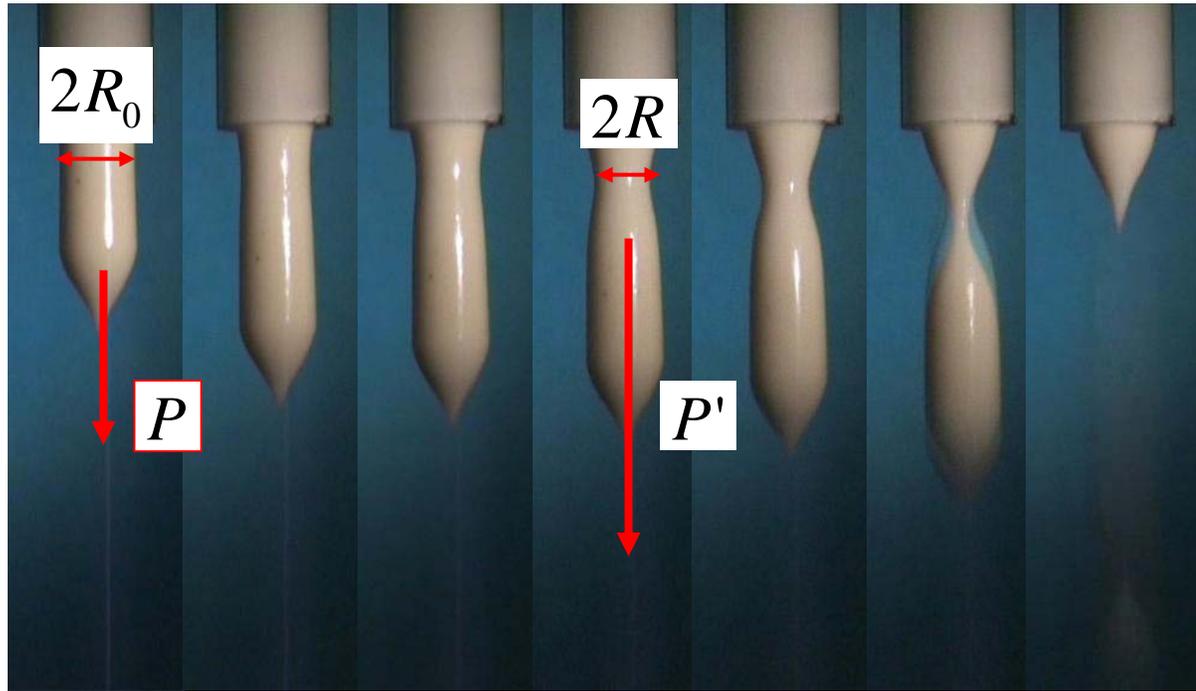
**Système  
« décoincé »**

Mais aussi :  
**Coexistence de phases !**



$$\tau \approx \frac{P}{\sqrt{3R_0^2}}$$

$$\tau < \tau_c$$



35s

60,61s

63,4s

64,42s

64,63s

64,7s

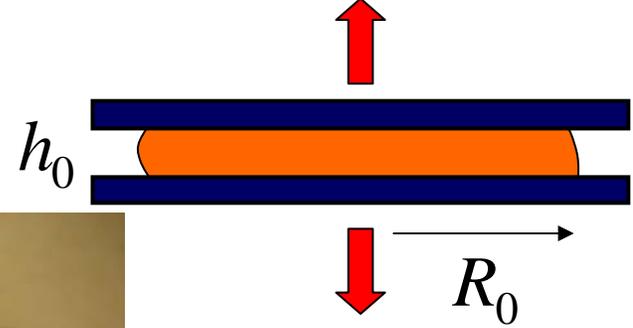
64,77s

$$\longrightarrow \tau = \tau_c$$

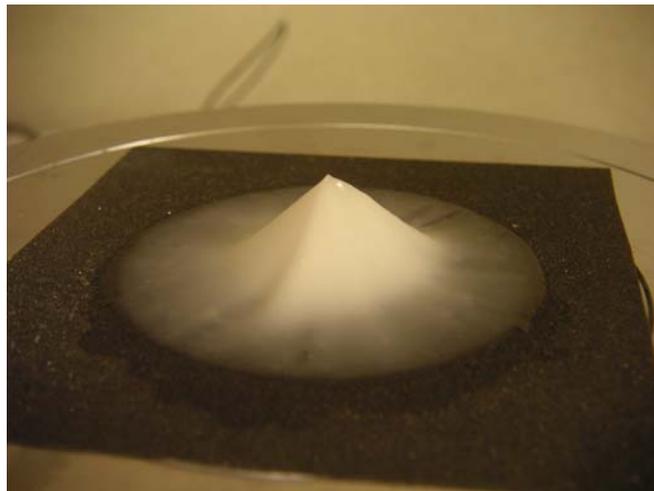
$$\tau \approx \frac{P'}{\sqrt{3R^2}}$$

**=> « Instabilité »**

# « Test d'adhésion »



(a)



(b)

$R_0/h_0 \nearrow$

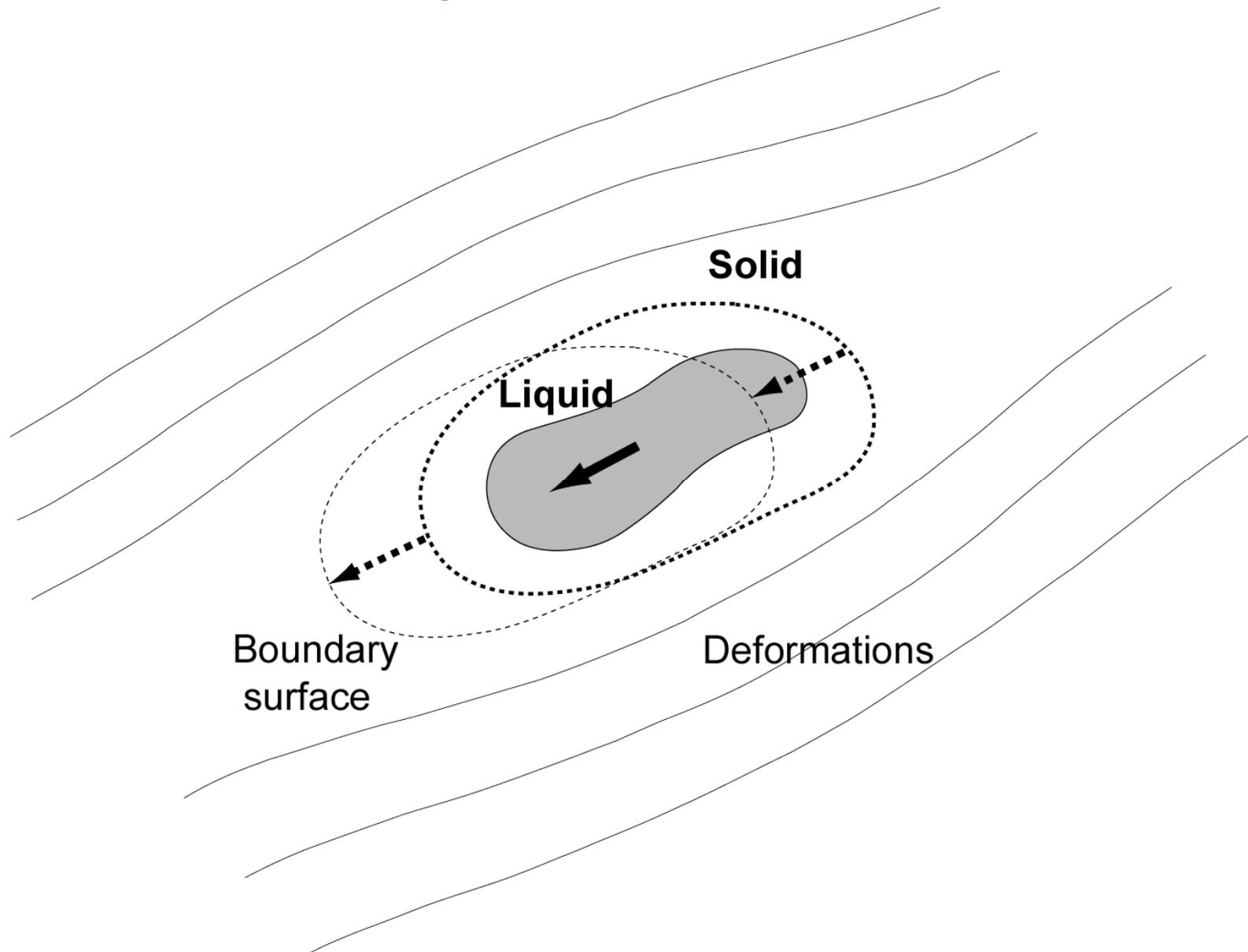


(c)

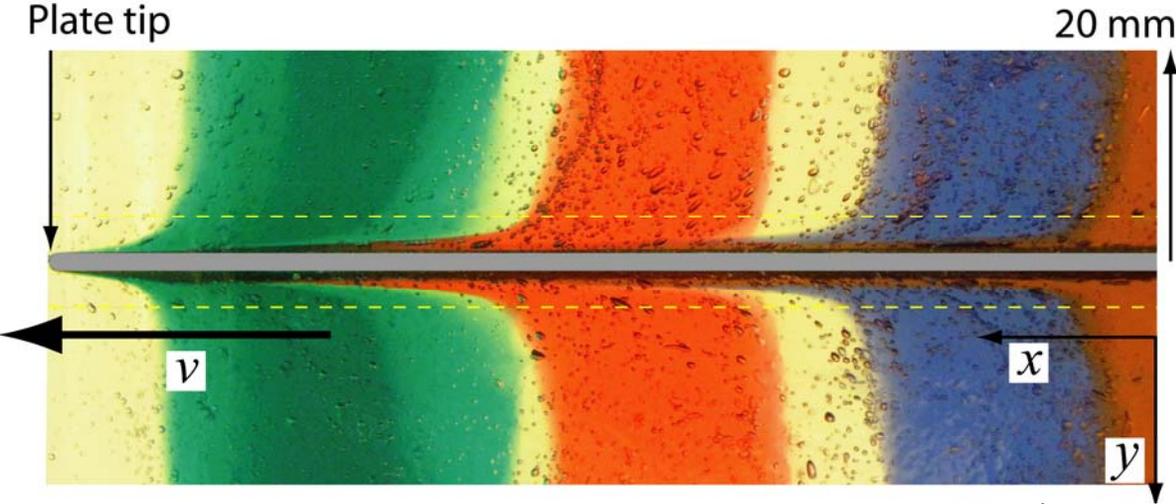


(d)

# Déplacement d'un objet à travers un fluide à seuil au repos

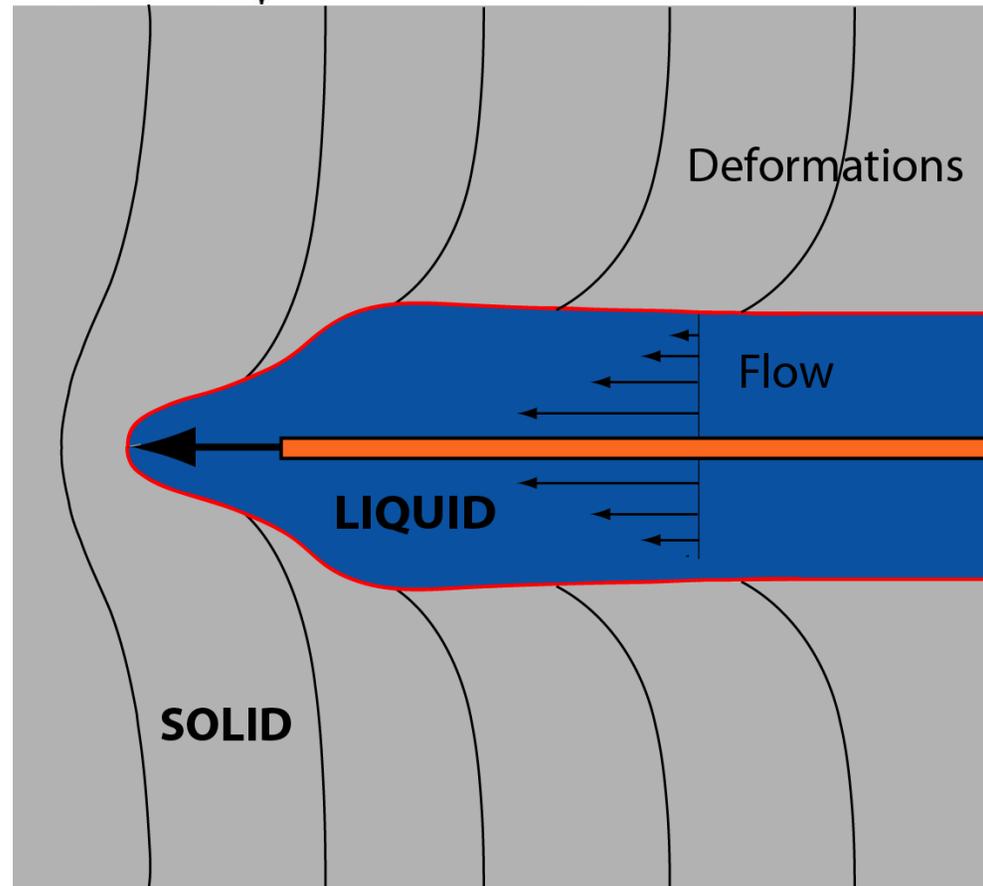


« Propagation d'une région liquide à travers un matériau solide »



Suivi des déformations  
locales le long  
de trajectoires =>

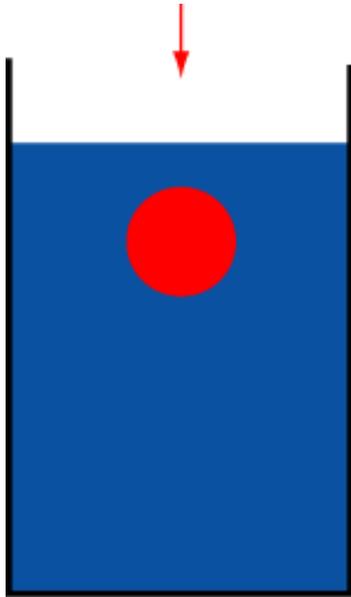
**Formation d'une  
« Couche-limite » liquide,  
d'épaisseur indépendante  
de la vitesse et des dimensions  
de la plaque**



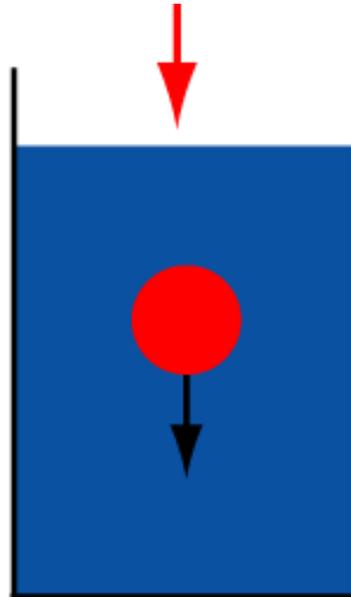
# Sédimentation dans un fluide à seuil

**Force !**

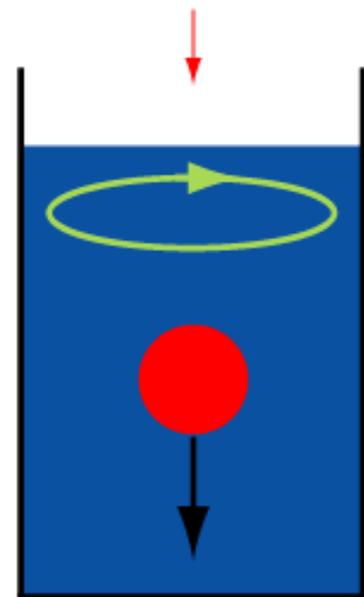
Faible



Elevée



Faible  
+ Ecoulement transverse

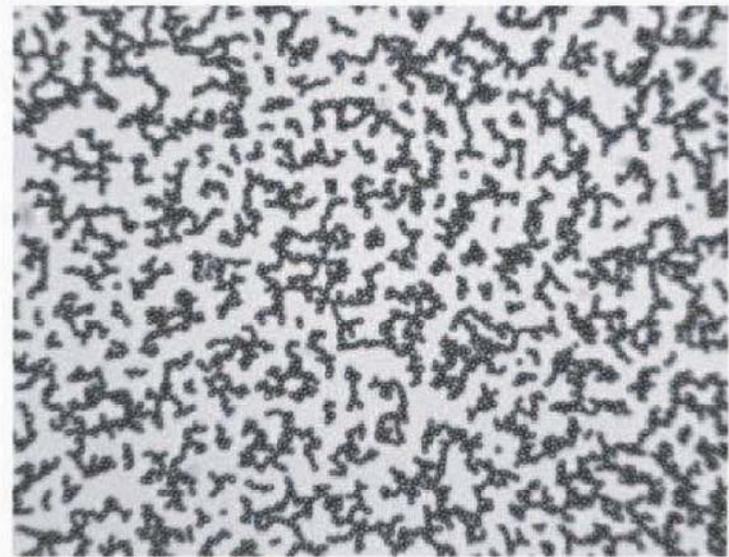
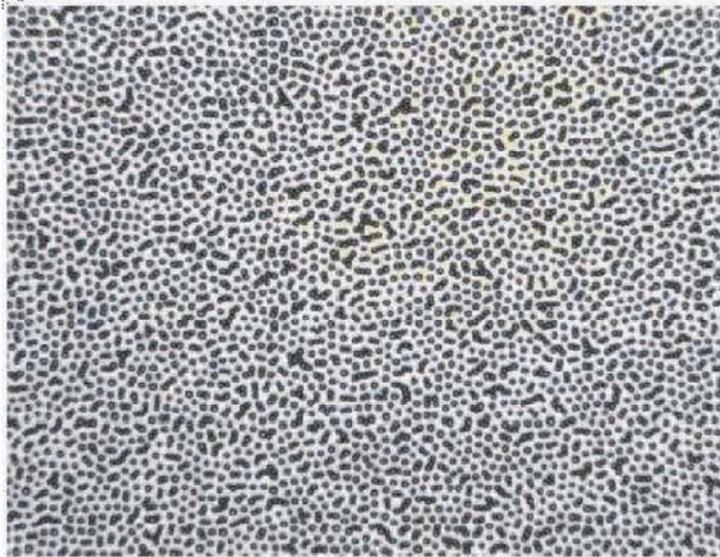


# Systemes attractifs

Repos



Cisaillement



Monocouche de billes de polystyrène (3.1mm)  
sur une interface eau-huile

Park et al., *Langmuir*, 2008

# Imagerie par Résonance Magnétique

6m

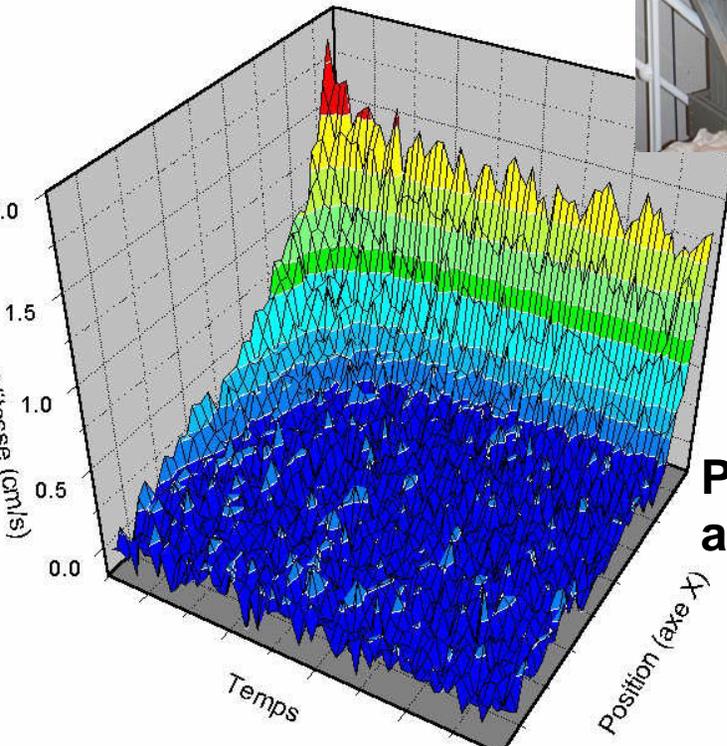


IFSTTAR

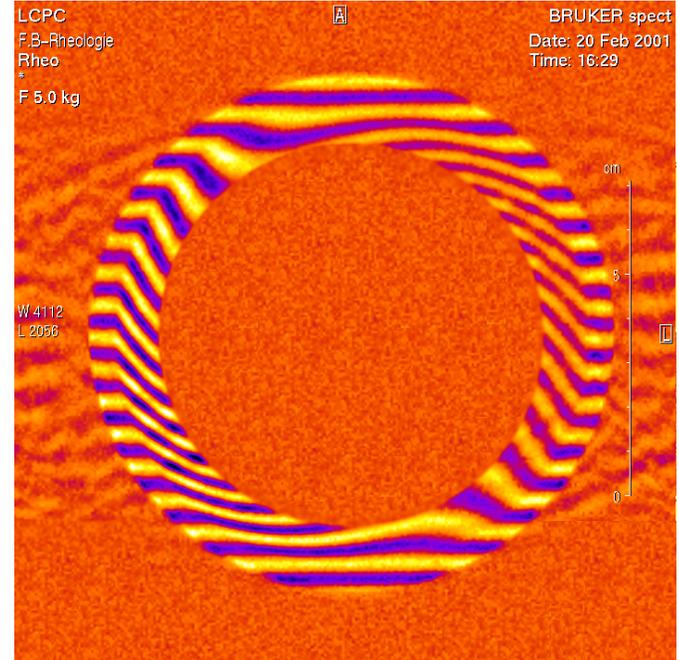
# Informations locales sur les caractéristiques de l'écoulement



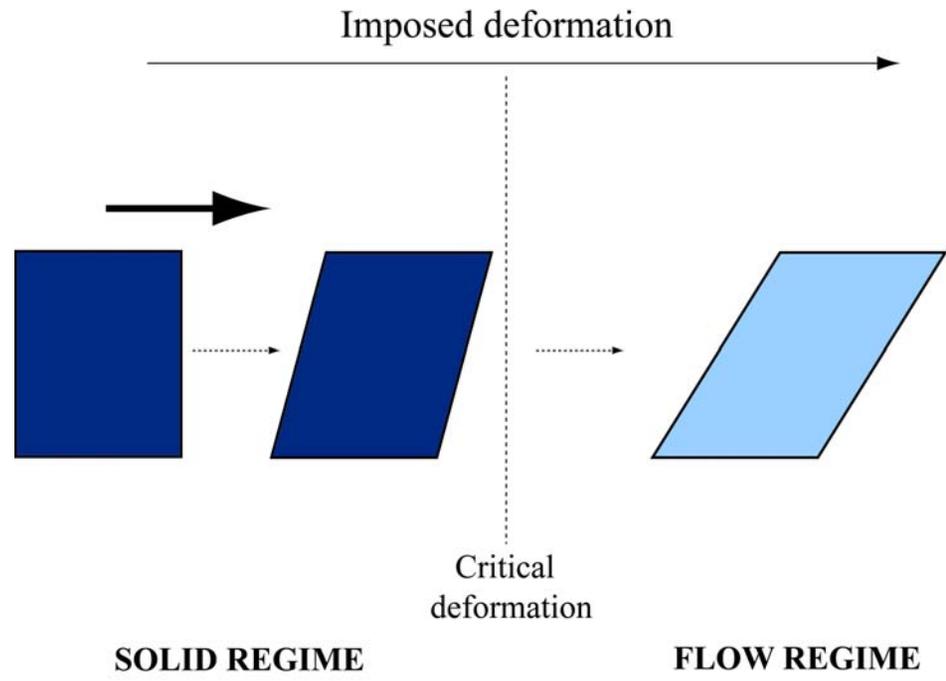
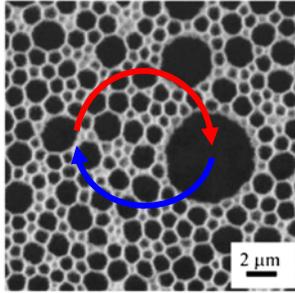
## Écoulement entre deux cylindres coaxiaux



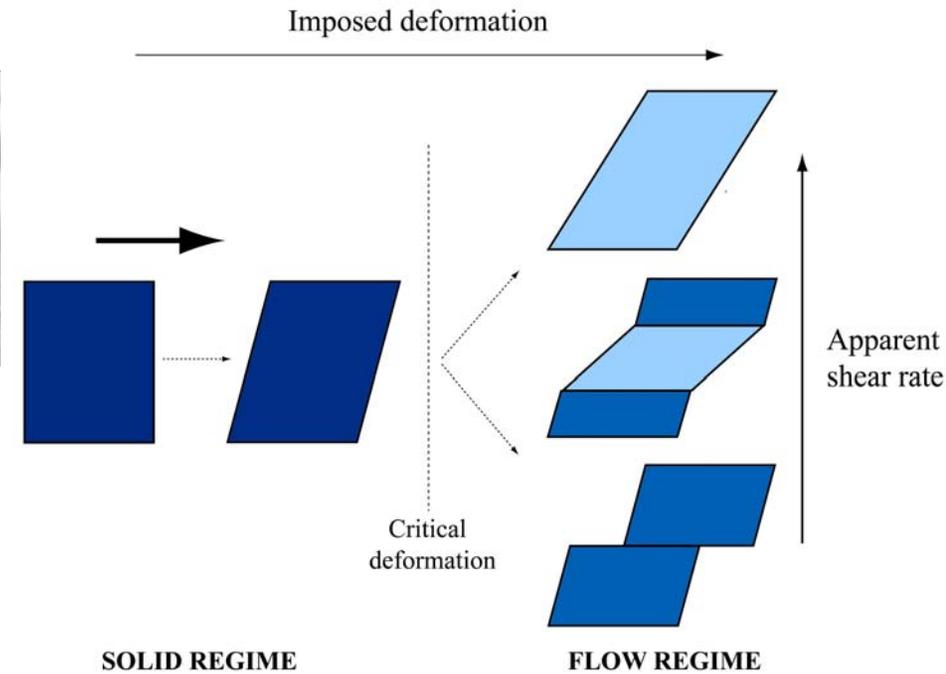
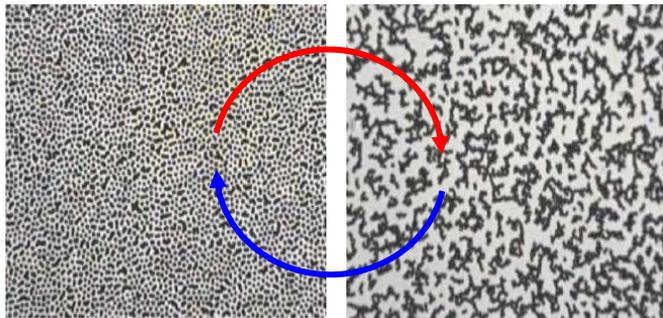
Profils des vitesses au cours du temps



# Fluides à seuil simples

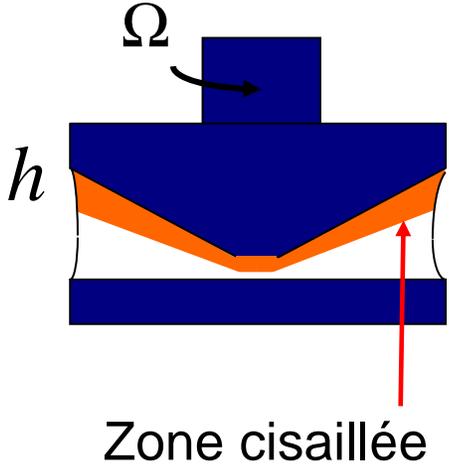
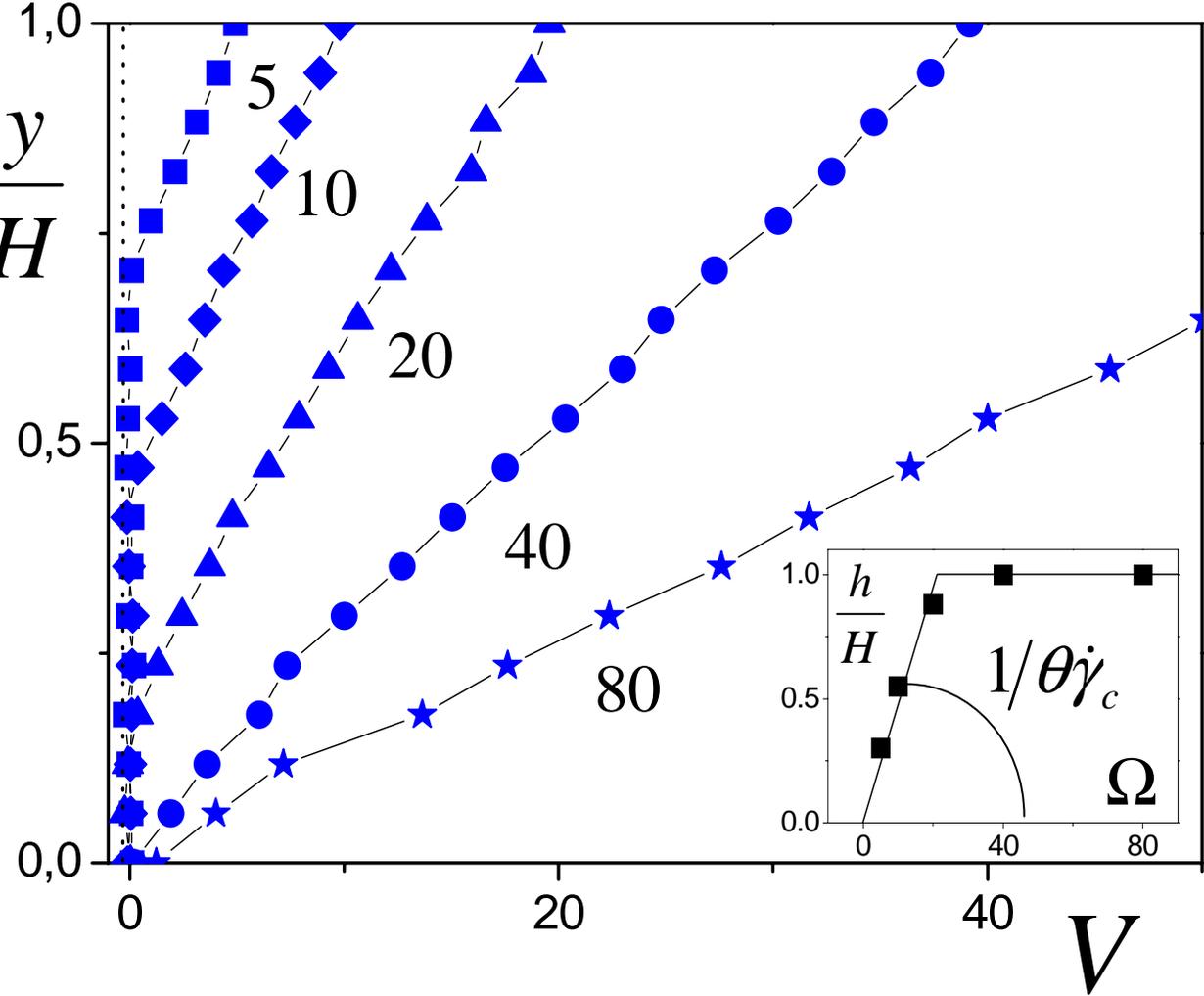


# Fluides à seuil thixotropes



# Ecoulement en cône-plan : bandes de cisaillement

Suspension de bentonite



$$\Omega < 23\text{rpm} \Rightarrow \dot{\gamma}_{app} = \frac{\Omega}{\theta} = \dot{\gamma}_c \frac{h}{H}$$

# Bétons



## Composants :

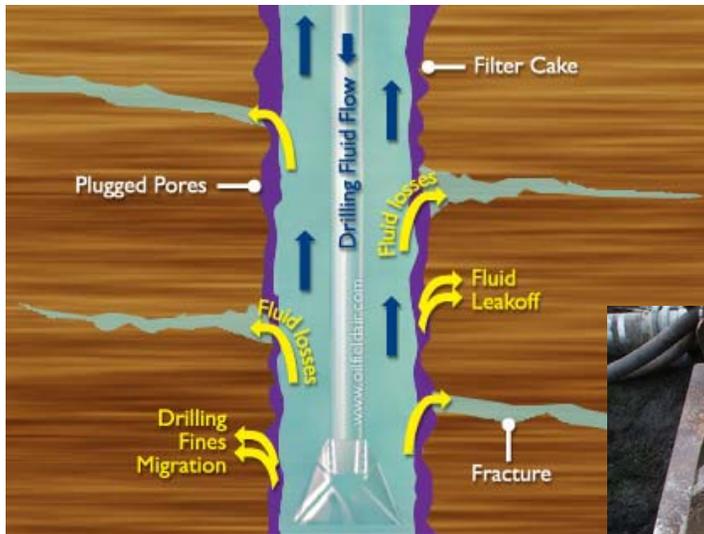
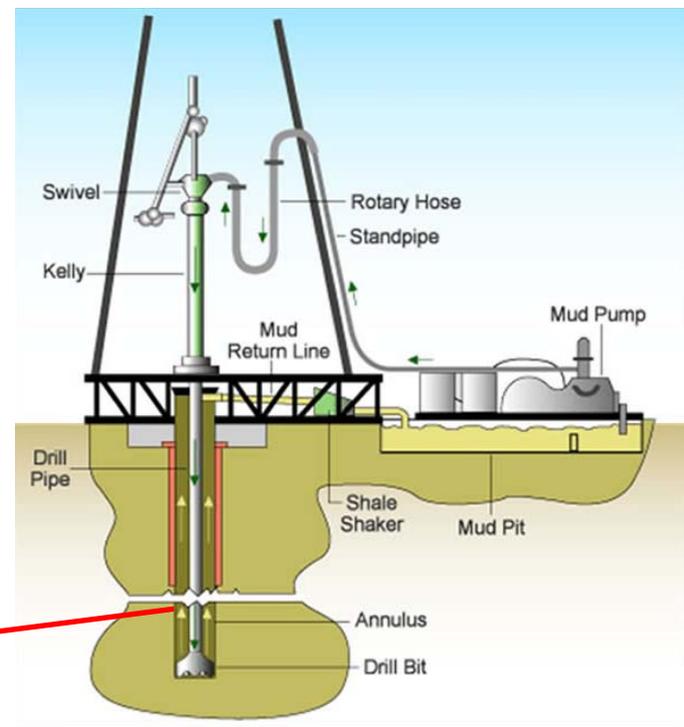
- Eau
- Ciment
- Granulats
- Additifs (surfactants)
- Nanoparticules



- Ecoulement sans blocage
- Pas de ségrégation
- Distribution homogène
- Pas de sédimentation
- Peu visqueux en éclt.



# Boues de forage



## Composants :

- Eau / Huile
- Bentonite (argile)
- Additifs (barite, chaux,...)
- Epaississant (glycol, xanthane,...)
- Déflocculant

- Lubrification des outils
- Transport ou tenue des grains à l'arrêt facile
- Formation d'un « cake » pour tenir la pression
- Stabilité de l'interface / ciment

*Le « boueux » (Mud Man)*

# Dentifrices



## Composants :

- Eau
- Abrasifs (silice)
- Epaississants (Xanthane, Cellulose)
- Humidifiants (Sorbitol, Glycérol)
- Agents « marketing » (arôme, moussage, couleur)
- Agents thérapeutiques

- Acheminement (pompage) facile
- Stabilité durant le stockage
- Extrusion facile
- Distribution précise des couleurs
- Séparation nette du tube de pâte
- Stabilité sur la brosse
- Bonne dispersion dans la bouche

