

# Les liquides élastiques: si courants et pourtant si bizarres

John Hinch

CMS-DAMTP, University of Cambridge

January 11, 2010

# Les liquides élastiques

Quelque chose entre liquide et solide, mais

Plus compliqués que les fluides visqueux simples

Plus compliqués que les solides élastiques simples

- ▶ Revue des fluides simples et des solides simples
- ▶ Liquides complexes
- ▶ Tension des lignes de courant
- ▶ Résistance à la déformation
- ▶ Un petit peu de théorie

# Les fluides simples

Bien étudiés depuis 100+ ans.

Bien compris: bibliothèque de comportement, équations, techniques de résolution, approche numérique, techniques expérimentales

Quelques exemples Toulousains (fluide = l'air)



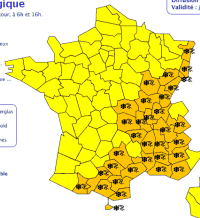
© AIRBUS 2009 \_ photo by S. RAMADIER

## Vigilance météorologique

La carte est actualisée au moins 2 fois par jour, à 0h et 16h.

- Une vigilance absolue s'impose** en cas de phénomènes météorologiques dangereux d'intensité exceptionnelle sur le territoire...
- Soyez très vigilant**, des phénomènes météorologiques dangereux sont prévus...
- Soyez attentif** si vous pratiquez des activités sensibles au risque météorologique...
- Pas de vigilance particulière.**


La vigilance pluie-inondation est élaborée avec le réseau de prévision des crues du Ministère du Développement durable



Diffusion : le jeudi 07 janvier 2010 à 16h00  
Validité : jusqu'au vendredi 08 janvier 2010 à 16h00

### Consultez le [bulletin national](#)

Un épisode neigeux, qui a débuté de la chaîne des Pyrénées au Jura et à l'Alsace, va s'amplifier fortement en gagnant le sud-est de la France, puis Rhône-Alpes et le Nord-Est.

Cliquez sur la carte pour lire les [bulletins régionaux](#)

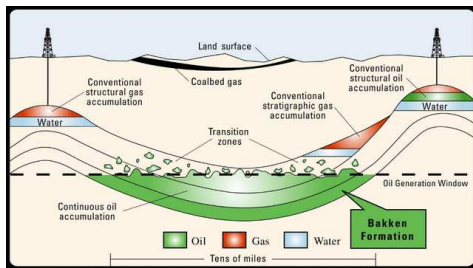
**Conseils des pouvoirs publics :**  
Neige-verglas/orages - Soyez très prudents et vigilants si vous devez absolument vous déplacer. Renseignez-vous sur les conditions de circulation - Respectez les restrictions de circulation et d'évacuation. Prévoyez un équipement adéquat en cas d'immobilisation prolongée.

**METEO FRANCE**  
Toujours à vos côtés

Copyright Météo-France

# Plus d'exemples de fluides simples

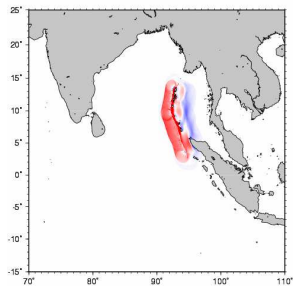
Sujets historiques de l'IMFT: hydroélectricité, milieux poreux



Et aujourd'hui: combustion, biomécanique, environnement

# Plus d'exemples de fluides simples

## Propagation des ondes: tsunami

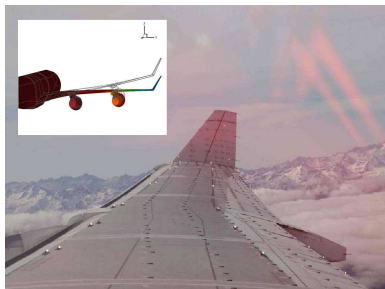


# Les solides simples

Bien étudiés depuis 100+ ans

Bien compris: bibliothèque de comportement, équations, techniques de résolution, approche numérique, techniques expérimentales

Un exemple important Toulousain: aéroélasticité

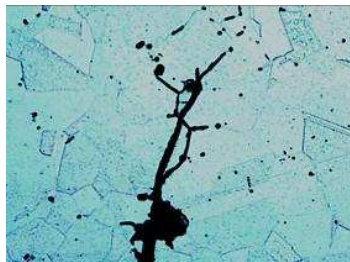
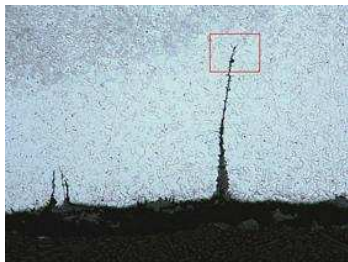


# Plus d'exemples de solides simples: structures (FE)



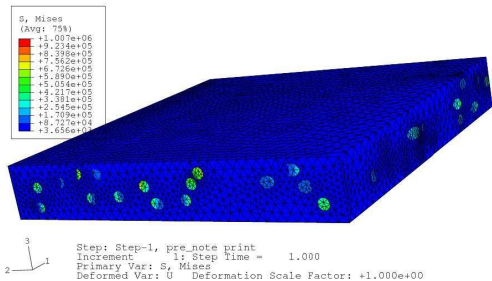


# Plus d'exemples de solides simples: fatigue



# Plus d'exemples de solides simples

## Matériaux composites et Tremblements de terre



# Les fluides et solides simples

Bien compris: bibliothèque de comportement, équations, techniques de résolution, approche numérique, techniques expérimentales

On peut prédire les valeurs des forces et des vitesses. On peut prédire leurs instabilités.

# Les fluides complexes

- ▶ Liquides-élastiques – sujet suivant

# Les fluides complexes

- ▶ Liquides-élastiques – sujet suivant
- ▶ Liquides à seuil



# Les fluides complexes

- ▶ Liquides-élastiques – sujet suivant
- ▶ Liquides à seuil



- ▶ Matériaux granulaires



- ▶ Où & lesquels  
produits plastiques, dans la préparation des aliments, liquides  
biologiques

- ▶ Où & lesquels

produits plastiques, dans la préparation des aliments, liquides biologiques

- ▶ Pourquoi & quand

Microstructure de quelques micromètres.

Temps de relaxation pour un nanomètre =  $10^{-9}$ s.

Temps  $\propto$  volume. Donc, 1s pour un micromètre.

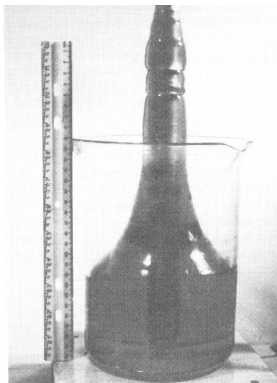


- ▶ Où & lesquels  
produits plastiques, dans la préparation des aliments, liquides biologiques
- ▶ Pourquoi & quand  
Microstructure de quelques micromètres.  
Temps de relaxation pour un nanomètre =  $10^{-9}$ s.  
Temps  $\propto$  volume. Donc, 1s pour un micromètre.
- ▶ Revue sans mathématiques

# Tension des lignes de courant

- ▶ Ascension d'une tige en rotation
- ▶ Écoulement secondaire
- ▶ Chaînes de particules formées par migration
- ▶ Migration au centre d'un tube
- ▶ Alignement avec la gravité des fibres en sédimentation
- ▶ Stabilisation de jets
- ▶ Instabilité de co-extrusion
- ▶ Force de portance négative
- ▶ Source de tension des lignes de courant

# Montant d'une tige en rotation

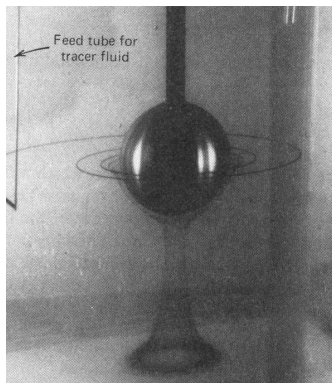


La cuisine: un fouet en rotation dans des blancs d'œuf

Bird, Armstrong & Hassager 1987,  
Vol 1 (2nd ed) pg 62

Tension des lignes de courant  $\rightarrow$  "hoop-stress" (force perpendicuaire)  $\rightarrow$  compression du liquide vers le centre et il monte

# Écoulement secondaire



Bird, Armstrong & Hassager

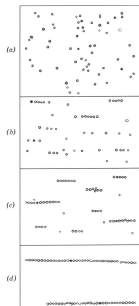
1987, Vol 1 (2nd ed) pg 70

Tension des lignes de courant  $\longrightarrow$  "hoop-stress" (force perpendicuaire)

Direction opposée à celle de l'effet d'inertie

# Chaînes de particules formées par migration

cisaillement  $\gamma$



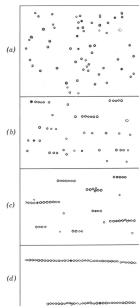
Bird, Armstrong & Hassager

1987, Vol 1 (2nd ed) pg 87

Tension des lignes de courant  $\longrightarrow$  force perpendiculaire  
 $\longrightarrow$  rassemblement des particules

# Chaînes de particules formées par migration

cisaillement  $\gamma$



Bird, Armstrong & Hassager

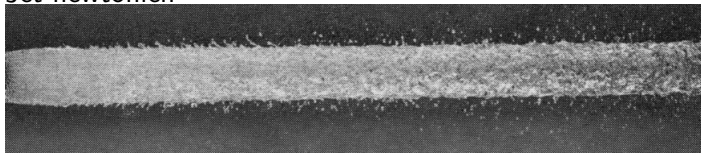
1987, Vol 1 (2nd ed) pg 87

Tension des lignes de courant  $\longrightarrow$  force perpendiculaire  
 $\longrightarrow$  rassemblement des particules

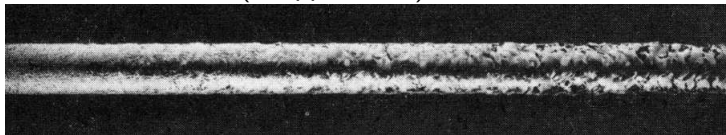
Aussi: Migration au centre d'un tube, et  
alignement avec la gravité des fibres en sédimentation

# Stabilisation des jets

Jet newtonien



Jet non newtonien (200ppm PEO)



Hoyt & Taylor 1977 JFM

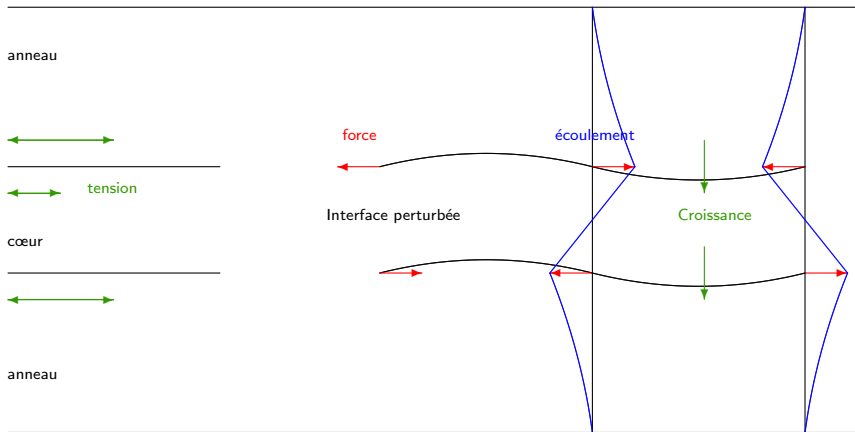
Tension des lignes de courant près de la surface  $\longrightarrow$  augmentation de la tension interfaciale.

Pour lutter contre les incendies,  
et pour réduire l'explosion d'un aérosol de pétrole

# Instabilité en co-extrusion

Un saut de tension des lignes de courant. Cas où le liquide central est moins élastique

Pas de problème si l'interface est plate

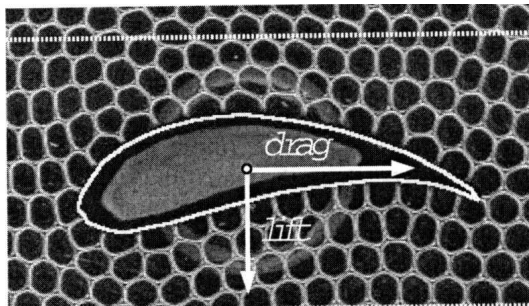




# Force de portance négative

Anti-Bernoulli

$$p - \frac{1}{2} \rho u^2 = \text{const}$$



Dollet, Aubouy & Graner 2005 PRL

# Source de tension des lignes de courant

cisaillement  $\gamma$



=

déformation



+

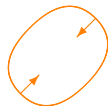
rotation



microstructure



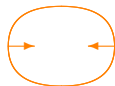
$\gamma$



contrainte tangentielle



$\gamma$



contrainte normale

# Tension des lignes de courant

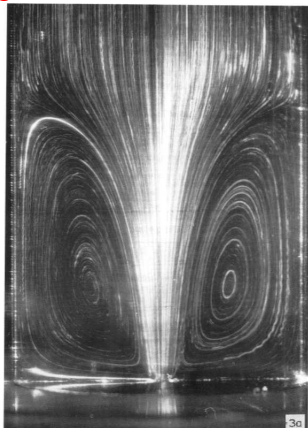
- ▶ Ascension d'une tige en rotation
- ▶ Écoulement secondaire
- ▶ Chaînes de particules formées par migration
- ▶ Migration au centre d'un tube
- ▶ Alignement avec la gravité des fibres en sédimentation
- ▶ Stabilisation des jets
- ▶ Instabilité de co-extrusion
- ▶ Force de portance négative
- ▶ Source de tension des lignes de courant

# Résistance à la déformation

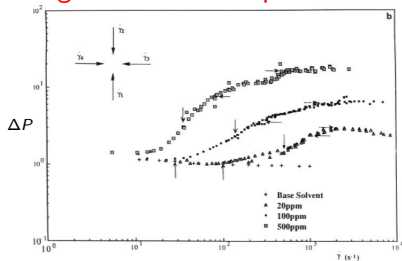
- ▶ Contraction
- ▶ Une sphère dans un écoulement
- ▶ Projet M1
- ▶ Polymère dans une imprimante à jet d'encre DoD
- ▶ Effet capillaire sur un pont liquide

# Contraction d'un grand à un petit tube

grand tourbillon en amont



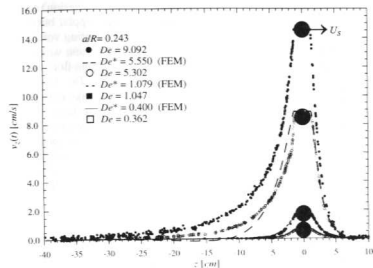
grande chute de pression



Cartalos & Piau 1992 JNNFM 92

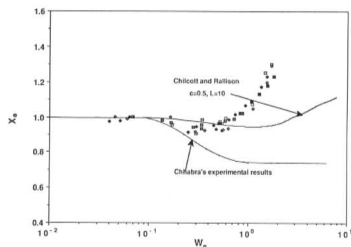
# Une sphère dans un écoulement

sillage long



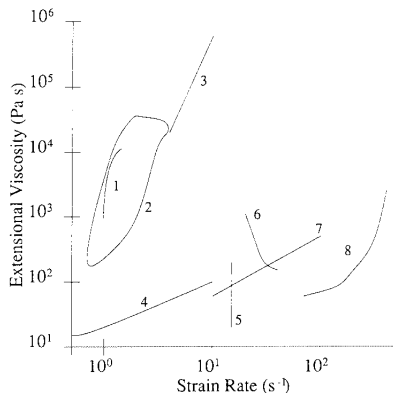
Arigo, Rajagopalan, Shapley & McKinley 1995 JNNFM

croissance du frottement



Tirtaatmadja, Uhlherr & Sridhar 1990 JNNFM

aussi sillage négatif



1. Open syphon
2. Spin line
3. Contraction
4. Opposing Jet
5. Falling drop
6. Falling bob
7. Contraction
8. Contraction

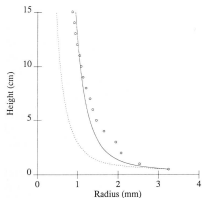
Keiller 1992 JNNFM

La viscosité extensionnelle n'existe pas!

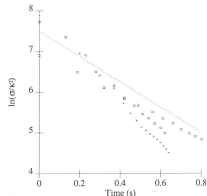
Le modèle d'Oldroyd-B marche bien avec:  $\mu_0 = 5$ ,  $G = 3.5$ ,  
 $\tau = 0.3$

Keiller 1992 JNNFM

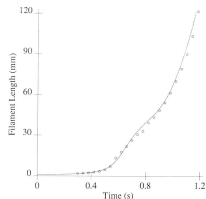
1. Open syphon Binding 1990



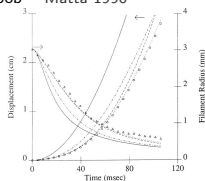
2. Spin line Oliver 1992



5. Falling drop Jones 1990



6. Falling bob Matta 1990





# Polymère dans une imprimante à jet d'encre DoD

– résistance à la déformation



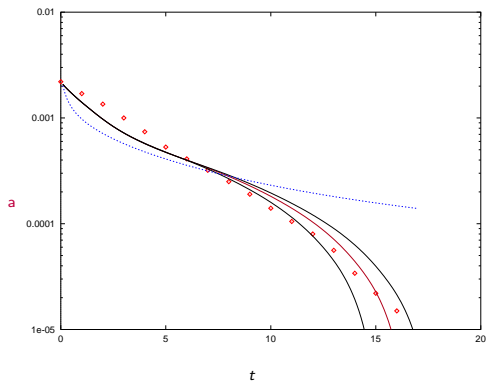
©2007 Steve Hoath, Ian Hutchings & Graham Martin

# Effet capillaire sur un pont liquide

Exemple: pour manger

# Effet capillaire sur un pont liquide

Exemple: pour manger



Résultats pour les modèles d'Oldroyd-B et FENE

Exp: Liang & Mackley 1994 JNNFM

Thy: Entov & Hinch 1997 JNNFM

# Résistance à la déformation

- ▶ Contraction
- ▶ Une sphère dans un écoulement
- ▶ Projet M1
- ▶ Polymère dans une imprimante à jet d'encre DoD
- ▶ Effet capillaire sur un pont liquide

# Un petit peu de théorie

- ▶ Modèle d'Oldroyd-B
- ▶ Modification de FENE
- ▶ Prédiction de FENE pour une sphère
- ▶ ... “birefringent strands”
- ▶ Prédiction de FENE pour une contraction

# Modèle d'Oldroyd-B:

La plus simple combinaison de viscosité + élasticité

$$\sigma = -p\mathbf{I} + 2\mu_0\mathbf{E} + G\mathbf{A}$$

contrainte                      visqueuse                      élastique

$\mu_0$  viscosité       $G$  module élastique

avec  $\mathbf{A}$  microstructure.

$$\frac{D\mathbf{A}}{Dt} = \mathbf{A} \cdot \nabla\mathbf{u} + \nabla\mathbf{u}^T \cdot \mathbf{A} - \frac{1}{\tau}(\mathbf{A} - \mathbf{I})$$

déformation par l'écoulement                      relaxation

$\tau$  temps de relaxation

## Finite Extension Nonlinear Elasticity

– pour éviter quelques infinis

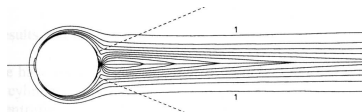
$$\frac{DA}{Dt} = A \cdot \nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T \cdot A - \frac{f}{\tau} (A - \mathbf{I})$$

$$\sigma = -p\mathbf{I} + 2\mu_0 E + GfA$$

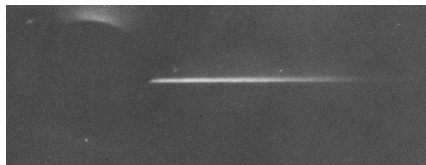
$$f = \frac{L^2}{L^2 - \text{trace } A} \quad \text{pour } A < L^2$$

# Prédictions de FENE pour une sphère

un sillage long avec des contraintes élevées



Chilcott & Rallison 1988 JNNFM



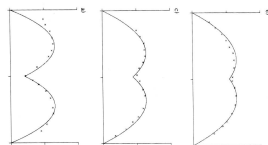
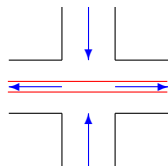
Cressely & Hocquart 1980 Opt Act

“Birefringent strand”



## ... théorie de "birefringent strands"

On peut l'appliquer aux écoulements avec un point de stagnation



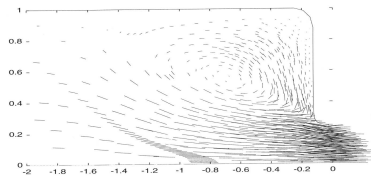
Harlen, Rallison & Chilcott 1990 JNNFM

Aussi bulles de shampoing avec un point de rebroussement en aval

# FENE prediction pour une contraction

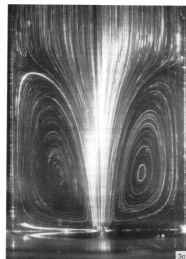
Augmentation de la chute de pression + vortex long en amont

FENE  $L = 5$



Szabo, Rallison & Hinch 1997 JNNFM

Expérience



Cartalos & Piau 1992 JNNFM

# Un petit peu de théorie

- ▶ Modèle d'Oldroyd-B
- ▶ Modification de FENE
- ▶ Prédiction de FENE pour une sphère
- ▶ ... “birefringent strands”
- ▶ Prédiction de FENE pour une contraction

- ▶ Revue des fluides simples et des solides simples
- ▶ Liquides complexes
- ▶ Tension des lignes de courant
- ▶ Résistance à la déformation
- ▶ Un petit peu de théorie

# Les liquides élastiques

Bien étudiés depuis 20 ans?

Bien compris?

- ▶ bibliothèque de comportement? – on commence
- ▶ équations? – quelques modèles
- ▶ techniques de résolution? – on commence
- ▶ approche numérique? – éléments finis lagrangiens
- ▶ techniques expérimentales? liquides-test standardisés