### Mélange dans les suspensions cisaillées

Mathieu Souzy<sup>1</sup> Directeur de thèse : Nora Chérifa Abid<sup>1</sup> Co-directeur : Bloen Metzger<sup>1</sup> Collaborateurs : Emmanuel Villermaux<sup>2</sup>, Phong Pham<sup>1,3</sup>, Henri Lhuissier<sup>1</sup>

 <sup>1</sup>Aix-Marseille Université, IUSTI-CNRS UMR 7343, 13453 Marseille Cedex 13, France
 <sup>2</sup>Aix-Marseille Université, IRPHE-CNRS UMR 7342, 13384 Marseille Cedex 13, France
 <sup>3</sup>Université de Floride, Department of Chemical Engineering, Gainesville, Floride 32611, USA

#### Novembre 2015

### Mélange dans les suspensions cisaillées

- $\rho_{fluide} = \rho_{particules}$
- $Re << 1 \rightarrow$  fluide très visqueux
- $Pe_p >> 1 \rightarrow$  particules non-browniennes





### Problématique :

Comment quantifier le mélange induit par l'agitation des particules ?





э

### DIFFUSION INDUITE PAR CISAILLEMENT ET MÉLANGE

- Eckstein et al. (1977)  $\rightarrow$  Diffusion induite par cisaillement
- Wang et Koch (2009)  $\rightarrow$  Transfert de masse (Méthode électrochimique)
- Metzger et al. (2013)  $\rightarrow$  Transfert de chaleur dans une suspension cisaillée
- Souzy et al. (2015)  $\rightarrow$  Mécanisme de transfert de masse en proche paroi

L'expérience de Taylor : Appliquer un cisaillement oscillant



 $\rightarrow$  Illustrer la réversibilité des écoulements à bas Re

G.I. Taylor (1966)

MATHIEU SOUZY IUSTI - CNRS MARSEILLE

# SUSPENSION DE PARTICULES EN CISAILLEMENT OSCILLANT



 $10^{-2}$ 

Film stroboscopique, Pine et Gollub, Nature, 2005

# SUSPENSION DE PARTICULES EN CISAILLEMENT OSCILLANT



 $10^{-2}$ 

Film stroboscopique, Pine et Gollub, Nature, 2005

# SUSPENSION DE PARTICULES EN CISAILLEMENT OSCILLANT





Film stroboscopique, Pine et Gollub, Nature, 2005

Que se passe-t-il lorsque l'on place une goutte de colorant dans la suspension ?

### DISPOSITIF EXPERIMENTAL - Cellule de Couette plan-plan



- Solution : Triton X-100, ZnCl<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O
- *d*=2mm
- φ=35%
- *γ*<sub>0</sub>: Amplitude cyclique de déformation

- $Pe_p >> 1$
- *Re* << 1
- ρ<sub>fluide</sub> = ρ<sub>particules</sub>
- N<sub>c</sub> : Nombre de cycles

### "PARTICLE TRACKING"



Ó

 $\gamma_0$ 

### Déformation d'une goutte de colorant



$$\gamma_0=0.5$$

 $\gamma_0 = 4$ 

• 
$$D_0 \approx 10^{-13} \text{m}^2 \text{.s}^{-1}$$

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > <

### Déformation d'une goutte de colorant



$$\gamma_0=0.5$$

 $\gamma_0 = 4$ 

• 
$$D_0 \approx 10^{-13} \text{m}^2 \text{.s}^{-1}$$

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > <





э

글 에 에 글 어

#### DISPERSION DES NIVEAUX DE CONCENTRATION



### COEFFICIENTS DE DIFFUSION



 $rac{D_f}{D_0}pprox 10^4$ Pour  $\gamma_0 > \gamma_c \quad \rightarrow$ 

#### 1 Mélange en cisaillement oscillant



3 × 4 3 ×



Fluide pur :



#### Suspension :



Fluide pur :



#### Suspension :



Fluide pur :



#### Suspension :



## Mélange : une approche en 2 étapes



i) Caractériser l'advection



ii) Brancher la diffusion moléculaire  $\rightarrow$  Prédictions de PDF(C)

### PIV dans la phase fluide



E >

### PIV dans la phase fluide





A B + 
 A B +
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A

< ≣ > \_\_\_\_

-

Э

#### Advection numérique dans l'écoulement mesuré

		A relation of the second se		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·			constructions of the construction	
		Contraction of the local division of the loc		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·			and a second	annen conducate
		damage and the second s					and a second state of the	and the state of t
	maker and			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		and the second se	and the second	and the second state of the the second state and a second
					the second	and the second	and the second se	and the second state of th
-				A local designment of	the second se		and the second se	and the the construction of the construction o
								110000 Feb.
					concerns the first first first first fig fig first fig first		A REAL PROPERTY AND A REAL PROPERTY A REAL	
						********************		
	* **				the rest of the	*********************	***************************************	*****
	****			and the test tests to the test test.	the second s	**********************	***************************************	*****
				<ul> <li>A reserve to the test to the</li> </ul>	and the second	~~~~~~	***************************************	
						~~~~~	***************************************	********
		100 C 100 C 100 E		1111 Concernence	~~~~	~~~~~	***************************************	***********************
						*******************	***************************************	*****************************
		A CONTRACTOR OF A CONTRACTOR OF A CONTRACTOR OF A CONTRACTOR A CONTRAC						
1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.		A CONTRACTOR NAMES		A CONTRACTOR OF A CONTRACT				
								ett
								1
				*********		*********************		
				*********	********************	********************		
				*********		*******************		
		******		*********	*******************	********************		
				**********	********************	*********************		
		A			* * * * * * * * * * * * * * * * * * * *	*********************		AA3
		A			********************			
					* * * * * * * * * * * * * * * * * * * *			*****
		A second second second					Contraction of the second s	
				and the second second				
							* * * * * * * * * * * * * * * * * * * *	************************
		A second second second		and the second second			***********************	A REAL AND A REAL PROPERTY AND
		A state of the second						A STATE A STATE AND A STATE AN
		A. K. K. K. K. K. K. K.						A S S S S S S S S S S S S S S S S S S S
		3.5						A S S S S S S S S S S S S S S S S S S S
		333 S						A S S S S S S S S S S S S S S S S S S S
		AXXXXXXXXXX						AND A RECEIPTION AND ADDRESS AND ADDRESS AND ADDRESS A
		AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA						NAME OF A DESCRIPTION O
		AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA						An end of the second
			And the Number does not do not do not					
			And the Mandala service and the day of					
					والمالي في في في في في في أن المالية المالية المالية المالية في ما 1000		~~~~~	and the second sec
	and a start of the		5 Vo Vo Vo Antho An An An An An		والفادي في في في الي الفائلة في الفائلة الفائلة الفائلة الفائلية (	والواليوني في في الوالي المارة المارة المارة المارة المارة المالية المالية المالية المالية المالية الم	الاستريبية والمعاصري الوالو الوالو الوالو الوالعا العاملة الما	A REPORT OF A R
	and the second s				والوالوالوالوالوالوالوالع الفالوالم المالما مالما معالما معالما الأرار ال		الما المحافظة المانية الوالي الوالي الوالي الوالي الوالية المائية ا	CONTRACTOR CONTRACTOR CONTRACTOR
	and the second sec				Concernment of the Concern of the Automatical			and a second
	and the second s				وتوليوا الماد بالماد بالمحالك والمستسولي	www.energenergenergenergenergenergenergener		No. of the second
	and the second s			بوبود بالالالي المهي	warmen war all a second a second as a second s	and a second sec	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	NN COLORIS COLORIS COMPANYAGE
	and a second sec			marker ware		and the second	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	Second and a second process of the
	and a second sec				and the second se		A REAL PROPERTY AND A REAL	and a second sec
	menning 1.		markeness				· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
	and the second se							
			-			the second se	A State of the second sec	
	the second se							

#### Advection numérique dans l'écoulement mesuré

		A relation and the second second		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·			constructions of the construction	
		Contraction of the local division of the loc		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·			and a second	annen conducate
		damage and the second s					constrained to the second s	and the state of t
	maker and			· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·		and the second se	and the second	and the second state of the the second state and a second
					the second	and the second	and the second se	and the second state of th
-				A local designment of	the second se		and the second se	and the the construction of the construction o
								110000 Feb.
					concerns the first first first first fig fig first fig first		A REAL PROPERTY AND A REAL PROPERTY A REAL PROPERTY AND A REAL PROPERTY A REAL PROPERTY AND A REAL PROPERTY A REAL PROPERTY AND A REAL PROPERTY A REAL PROPERTY AND A REAL PROPERTY A REAL PROPERTY AND A REAL PROPERTY A REAL PROPERTY AND A REAL PROPERTY A REAL PROPERTY AND A REAL PROPERTY A REAL	
						********************		
	* **				the rest of the	*********************	***************************************	*****
	****			and the test tests to the test test.	the second s	**********************	***************************************	*****
				<ul> <li>A reserve to the test to the</li> </ul>	and the second	~~~~~~	***************************************	
						~~~~~	***************************************	********
		100 C 100 C 100 E		1111 Concernence		~~~~~	***************************************	***********************
						*******************	***************************************	*****************************
		A CONTRACTOR OF A CONTRACTOR OF A CONTRACTOR OF A CONTRACTOR A CONTRAC						
1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.1.		A CONTRACTOR NAMES		A CONTRACTOR OF A CONTRACT				
								ett
								1
				*********		*********************		
				*********	********************	********************		
				*********		*******************		
		******		*********	*******************	********************		
				**********	*******************	*********************		
		A			* * * * * * * * * * * * * * * * * * * *	*********************		AA3
		A			********************			
					* * * * * * * * * * * * * * * * * * * *			*****
		A second second second					Contract of the second s	
				and the second second				
							* * * * * * * * * * * * * * * * * * * *	************************
		A second second second		and the second second			**********************	A REAL AND A REAL PROPERTY AND A REAL PROPERTY OF
		A state of the second						A STATE A STATE AND A STATE AN
		A. K. K. K. K. K. K. K.						A S S S S S S S S S S S S S S S S S S S
		3.5						A S S S S S S S S S S S S S S S S S S S
		333 S						A S S S S S S S S S S S S S S S S S S S
		AXXXXXXXXXX						AND A RECEIPTION AND AND AND AND AND AND AND AND AND AN
		AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA						NAME OF A DESCRIPTION O
		A A A A A A A A A A A A						An end of the second
			And the Number does not do not do not					
			And the Mandala service and the day of					
					والمالي في في في في في في أن المالية المالية المالية المالية في ما 1000		~~~~~	and the second sec
	and a start of the		5 Vo Vo Vo Antho An An An An An		والفادي في في في الي الفائلة في الفائلة الفائلة الفائلة الفائلية (	والواليوني في في الوالي المارة المارة المارة المارة المارة المالية المالية المالية المالية المالية الم	الاستريبية والمعاصري الوالو الوالو الوالو الوالعا العاملة الما	A REPORT OF A R
	and the second s				والوالوالوالوالوالوالوالع الفالوالم المالما مالما معالما معالما الأرار ال		الما المحافظة المانية الوالي الوالي الوالي الوالي الوالية المائية ا	CONTRACTOR CONTRACTOR CONTRACTOR
	and the second sec				Concernment of the Concern of the Automatical			and a second
	and the second s				وتوليوا الماد بالماد بالمالك والمتمتوين	www.terterenergesprogrammerer.et		No. of the second
	and the second s			بوبود بالالالي المهي	warmen war all a second a second as a second s	and a second sec	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	NN COLORIS COLORIS COMPANYAGE
	and a second sec			marker ware		and the second	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	Second and a second second second second
	and a second sec				and the second se		A REAL PROPERTY AND A REAL	and a second sec
	menning 1.		markeness				· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
	and the second se							And the second se
			-			the second se	A State of the second sec	
	the second se							



• Nombre de segments  $\approx 25000$ 



ヘロト 人間ト 人造ト 人造ト

# LOIS D'ÉTIREMENT



• Etirement exponentiel

Distribution log-normale

# LOIS D'ÉTIREMENT



# MODÈLE



Mélange dans les suspensions cisaillées

æ

# Modèle



프 🕨 🛛 프

# Modèle



Mélange dans les suspensions cisaillées

< 🗇 🕨

æ

4 E b

# MODÈLE



# Modèle



# Modèle - Processus d'étirement multiplicatif



Redistribution of the shear rate map

\_\_\_\_

★ 문 ► ★ 문 ►

# Modèle - Processus d'étirement multiplicatif



 $\ln \rho$  : Distribution normale  $\implies \rho$  : Distribution log-normale

MATHIEU SOUZY IUSTI - CNRS MARSEILLE

Mélange dans les suspensions cisaillées

# Modèle - Processus d'étirement multiplicatif



 $\ln \rho$  : Distribution normale  $\implies \rho$  : Distribution log-normale

$$\langle \ln \rho \rangle = \frac{t}{2\alpha\tau} \langle \ln(1 + \frac{(\dot{\gamma}_{\text{loc}}\alpha\tau)^2}{2}) \rangle$$

$$Var(\ln \rho) = \frac{t}{4\beta\tau} [\langle \ln^2(1 + \frac{(\dot{\gamma}_{\text{loc}}\beta\tau)^2}{2}) \rangle - \langle \ln(1 + \frac{(\dot{\gamma}_{\text{loc}}\alpha\tau)^2}{2}) \rangle^2]$$

 $\alpha, \beta$  : Paramètres de structure d'ordre 1

### Comparaison avec le modèle



 $\alpha = 0.3$   $\beta = 5.2$   $\Leftarrow$  Même valeur pour tous les  $\phi$ 

Mélange : une approche en 2 étapes

i) Caractériser l'advection  $\Rightarrow PDF(\rho(\phi))$ 



3

▲ 同 ▶ ▲ 臣 ▶ ▲ 臣 ▶ …

Mélange : une approche en 2 étapes

i) Caractériser l'advection  $\Rightarrow PDF(\rho(\phi))$ 



ii) Brancher la diffusion moléculaire



For 
$$t = t_{\text{mix}}$$
  
 $\frac{1}{s} \frac{ds}{dt} = \frac{D_0}{s^2} \implies \begin{cases} l(t) = l_0 e^{\omega t} \to s(t) = s_0 e^{-\omega t} \\ t_{\text{mix}} = \frac{1}{2\omega} \ln(1 + \frac{2\omega s_0^2}{D_0}) \\ \omega \sim \frac{\langle \dot{\gamma}_{\text{loc}}(\phi)^2 \rangle \alpha \tau(\phi)}{2} \end{cases}$ 

### TRAVAIL EN COURS



$$t_{
m mix}(\phi) \!=\! rac{1}{\langle \dot{\gamma}_{
m loc}(\phi)^2 
angle lpha au(\phi)} \ln(1 \!+\! rac{\langle \dot{\gamma}_{
m loc}(\phi)^2 
angle lpha au(\phi) s_0^2}{D_0})$$

 $\Rightarrow$  For  $\phi = 35\% : \dot{\gamma}t_{\rm mix} \approx 50$ 

(本語) (本語) (本語) (二)

### TRAVAIL EN COURS



$$t_{\rm mix}(\phi) = \frac{1}{\langle \dot{\gamma}_{\rm loc}(\phi)^2 \rangle \alpha \tau(\phi)} \ln\left(1 + \frac{\langle \dot{\gamma}_{\rm loc}(\phi)^2 \rangle \alpha \tau(\phi) s_0^2}{D_0}\right)$$
  

$$\Rightarrow \text{ For } \phi = 35\% : \dot{\gamma} t_{\rm mix} \approx 50$$

$$P(\frac{\rho}{\langle \rho \rangle})_{10^0} = \frac{1}{10^{-2}} = \frac{1}{10^{-4}} = \frac{1}{10^{-4}} = \frac{1}{10^{-2}} = \frac{1}{10^{-4}} = \frac{1}{10^{-4}} = \frac{1}{10^{-2}} = \frac{1}{10^{-4}} =$$

 $\Rightarrow$  Prédictions des PDF(C)...

(本部) (本語) (本語) (語