

Dossier de recherche

Mise en perspective didactique

Benjamin Marchetti

- 1 Introduction
- 2 Parcours universitaire et professionnel
- 3 Mes travaux de recherche
 - Qu'est-ce-que le régime visqueux ?
 - Nuage de particules dans un écoulement
 - Fibre flexible dans un fluide visqueux au repos
- 4 Autres activités d'enseignement
- 5 Conclusion

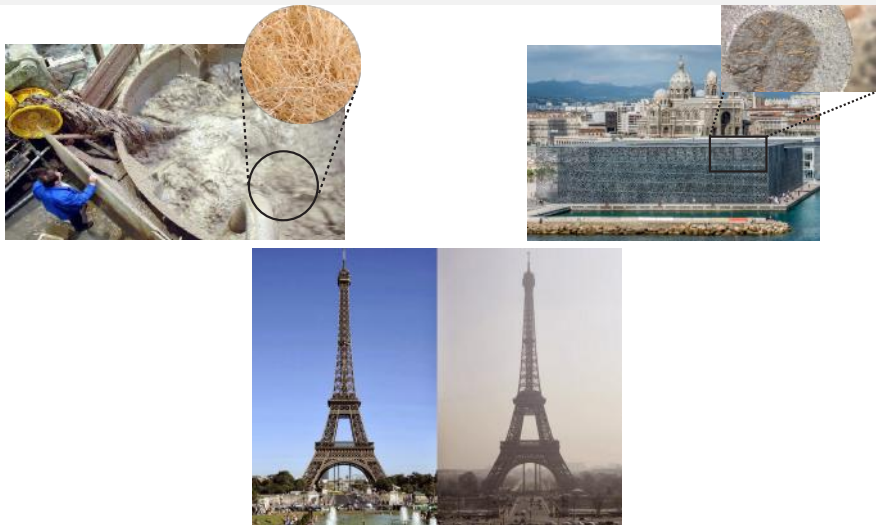
- 1 Introduction
- 2 Parcours universitaire et professionnel
- 3 Mes travaux de recherche
 - Qu'est-ce-que le régime visqueux ?
 - Nuage de particules dans un écoulement
 - Fibre flexible dans un fluide visqueux au repos
- 4 Autres activités d'enseignement
- 5 Conclusion

- 1 Introduction
- 2 Parcours universitaire et professionnel
- 3 Mes travaux de recherche
 - Qu'est-ce-que le régime visqueux ?
 - Nuage de particules dans un écoulement
 - Fibre flexible dans un fluide visqueux au repos
- 4 Autres activités d'enseignement
- 5 Conclusion

- **2012 - 2015** : Formation à l'école d'ingénieur Polytech Marseille Dpt Mécanique et Énergétique, Aix-Marseille Université
- **2015** : Master 2 Recherche : Écoulement diphasique, énergétique et combustion, Aix-Marseille Université
- **2015 - 2018** : Doctorat en Mécanique des fluides, Laboratoire I.U.S.T.I. (Institut Universitaire des Systèmes Thermiques et Industriels) UMR 7343
- **2019 - 2020** : Professeur PLP de Maths-Sciences
- **2020** : Master 2 Métier de l'Enseignement de l'Education et de la Formation, Université Nice Sophia Antipolis
- **Depuis 2020** : Professeur certifié de sciences physiques

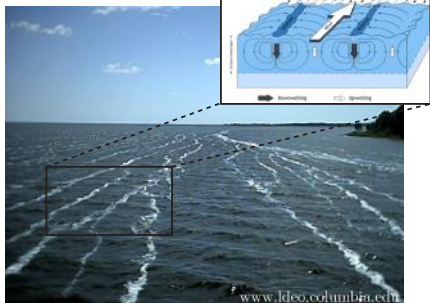
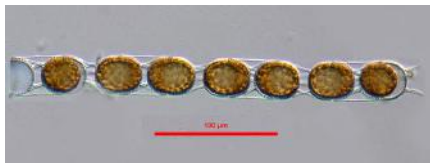
- 1 Introduction
- 2 Parcours universitaire et professionnel
- 3 Mes travaux de recherche**
 - Qu'est-ce-que le régime visqueux ?
 - Nuage de particules dans un écoulement
 - Fibre flexible dans un fluide visqueux au repos
- 4 Autres activités d'enseignement
- 5 Conclusion

Écoulement de particules dans l'industrie



Industrie du papier (gauche) ; Béton fibré (droite) ; Paris (2014) (centre)

Écoulement de particules dans la nature



Stephanopyxis nipponica (haut) ; Circulation de Langmuir (bas)



Eyjafjöll, Islande (2010)

- 1 Introduction
- 2 Parcours universitaire et professionnel
- 3 **Mes travaux de recherche**
 - **Qu'est-ce-que le régime visqueux ?**
 - Nuage de particules dans un écoulement
 - Fibre flexible dans un fluide visqueux au repos
- 4 Autres activités d'enseignement
- 5 Conclusion

Sédimentation en régime visqueux

Qu'est ce que le régime visqueux ?

- Pour un élément isolé :
 $Re_a < 10^{-4}$
- Pour un ensemble d'éléments : $Re_c < 10^{-1}$

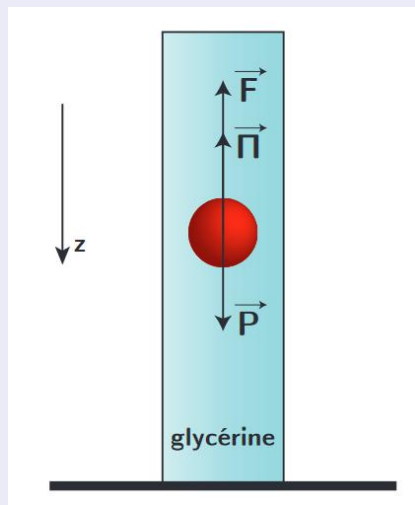
Application didactique : Définition du nombre de Reynolds

$$Re = \frac{\text{Forces inertielles}}{\text{Forces visqueuses}} = \frac{U_s \rho_f \ell}{\mu_f}$$

- U_s vitesse de sédimentation (vitesse de Stokes) ;
- ℓ longueur caractéristique de l'objet ;
- ρ_f masse volumique du fluide environnant ;
- μ la viscosité dynamique du fluide.

Comment déterminer U_s ?

Application didactique : Mesure de la vitesse de chute d'un sphère



Mise en évidence de trois régimes :

- Régime initial
- Régime transitoire
- Régime permanent : Mesure de la vitesse de Stokes. En faisant un bilan des forces :

$$U_s = \frac{2}{9} \frac{(\rho_p - \rho_f) R^2}{\mu_f} g$$

→ Principe du viscosimètre à bille (1840)

Sédimentation d'une particule dans un fluide au repos

Application didactique : champ de vitesses et pressions autour d'une sphère

- Écoulement **incompressible**, **stationnaire**, **irrotationnel** et **visqueux**
- Champ de vitesses :

$$\vec{v}(R, \theta) = U_s \cos \theta \left(1 - \frac{R^3}{r^3} \right) \vec{e}_r - U_s \sin \theta \left(1 + \frac{R^3}{2r^3} \right) \vec{e}_\theta$$

- Détermination de l'équation de Stokes :

$$\overrightarrow{\text{grad}} \mathbf{p} = \mu \overrightarrow{\Delta} \vec{v}$$

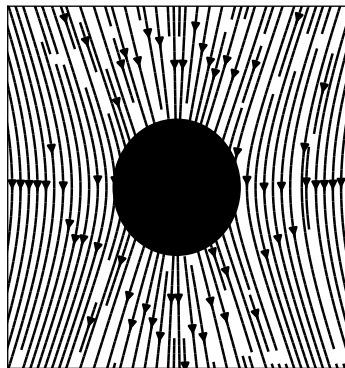
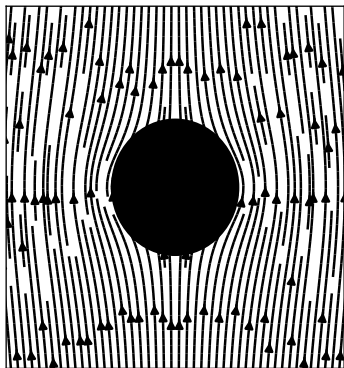
- Champ de pressions :

$$p(r, \theta) = P_0 - \mu \frac{3UR \cos \theta}{2r^2}$$

Sédimentation d'une particule dans un fluide au repos

Application didactique : champ de vitesses d'une sphère à l'aide de python

Ecoulement à bas nombre de Reynolds



Référentiel sphère au repos (Gauche) - Référentiel fluide au repos (Droite)

Sédimentation d'une particule dans un fluide au repos

Application didactique : champ de vitesses d'une sphère à l'aide de python

```
U=1 #vitesse de stokes  
R=1 #rayon de la sphère  
r = np.sqrt(X**2 + Y**2) #position  
theta = np.arctan2(Y, X) #angle
```

```
v_r = U * (1 - R**3 / r**3) * np.cos(theta)  
v_theta = -U * (1 + R**3 / (2*r**2)) * np.sin(theta)  
  
v_x = np.cos(theta) * v_r - np.sin(theta) * v_theta  
v_y = np.sin(theta) * v_r + np.cos(theta) * v_theta
```

Exemple de code en langage python pour calculer le champ de vitesses

Sédimentation d'une particule dans un fluide au repos

Application didactique : force de traînée en régime visqueux

- Force de pression sur la sphère :

$$\vec{F}_{\text{pression}} = \int \int_{\text{sphere}} -p(R, \theta) d\vec{S} = 2\pi\mu RU_s \vec{e}_z$$

- Force de cisaillement exercée par le fluide sur un élément de surface de la sphère :

$$\vec{F}_{\text{cis}} = \int \int \mu \frac{\partial v_\theta}{\partial r}(R, \theta, \varphi) R^2 \sin \theta d\theta d\varphi \vec{e}_\theta = 4\pi\mu RU_s \vec{e}_z$$

- Force de traînée : **Formule de Stokes**

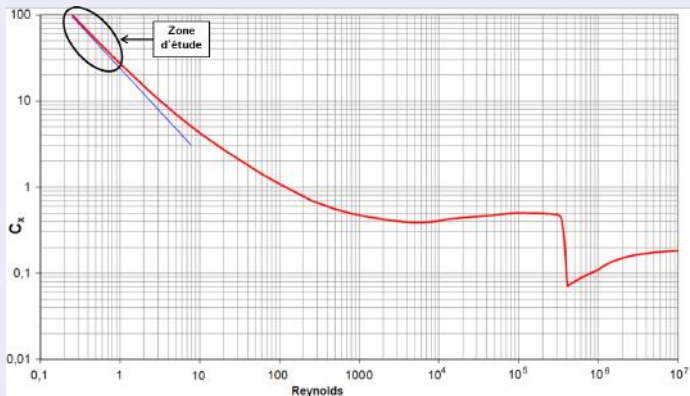
$$\vec{F} = \vec{F}_{\text{pression}} + \vec{F}_{\text{cis}} = 6\pi\mu RU_s \vec{e}_z$$

Sédimentation d'une particule dans un fluide au repos

Application didactique : Coefficient de traînée

Détermination du coefficient de traînée :

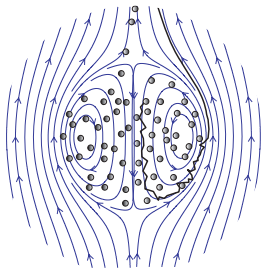
$$C_x = \frac{F}{\frac{1}{2}\rho U_s^2 S} = \frac{24}{Re}$$



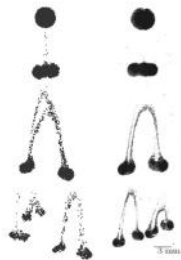
Nuage de particules dans un fluide au repos

Comment obtenir l'écoulement pour un ensemble de particules ?

- Addition du champ de vitesses de chaque particule.
→ Recirculation des particules au sein du nuage.
- Éléments quantifiables avec python : forme du nuage ; pertes en particules...



Écoulement produit par un nuage de particules

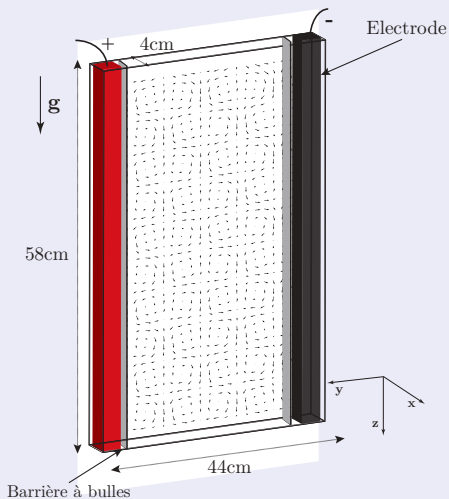


Nuage de particules qui sédimente.
(Gauche) Simulation, (Droite) Expérience

- 1 Introduction
- 2 Parcours universitaire et professionnel
- 3 **Mes travaux de recherche**
 - Qu'est-ce-que le régime visqueux ?
 - **Nuage de particules dans un écoulement**
 - Fibre flexible dans un fluide visqueux au repos
- 4 Autres activités d'enseignement
- 5 Conclusion

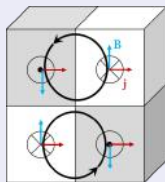
Comment créer et contrôler un écoulement tourbillonnaire ?

Application didactique : Force de Laplace et électroconvection



- Mélange : Eau + acide citrique + Ucon oil
- Calcul de la force de Laplace :

$$\vec{F}_L = \vec{j} \wedge \vec{B}$$

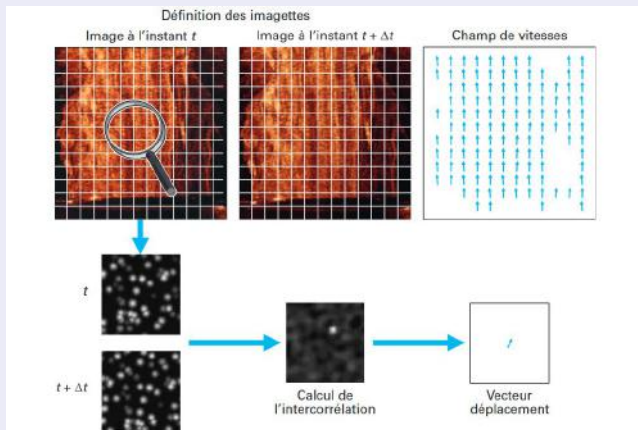


- Étude paramétrique : vitesse en fonction de I et/ou σ

Comment mesurer le champ de vitesses ?

Application didactique : Principe de la P.I.V.

- Notion sur les descriptions eulérienne et lagrangienne
- Principe de la P.I.V (Particle Image Velocimetry)

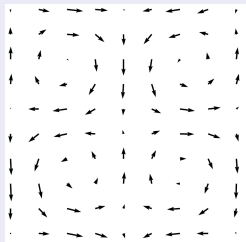


Nuage de particules dans un écoulement

Analyse de la situation

- Écoulement de type Taylor-Green (ρ_f , μ , U_0 et $k = \pi/L$) :
- $$\psi = \frac{U_0}{k} \sin(kx_1) \sin(kx_2)$$

- Particules : a et ρ_p
- Nuage : R_c et N_0
- Sédimentation : g



Application didactique : théorème de Π

- Principe : 9 **grandeurs** - 3 **dimensions** = 6 **paramètres**
- 6 paramètres adimensionnés indépendants pour décrire le système :

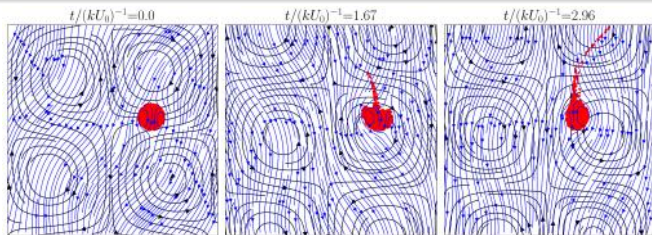
Re_k , Re_a , $W = U_s/U_0$, N_0 , $P = ak$ ou $Q = R_c k$ et

$$St = \frac{2}{9} \left(\rho_p + \frac{\rho_f}{2} \right) \frac{a^2 k U_0}{\mu}$$

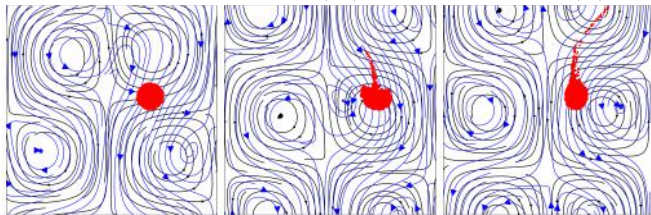
Nuage de particules dans un écoulement

Application didactique : Calcul champ de vitesses

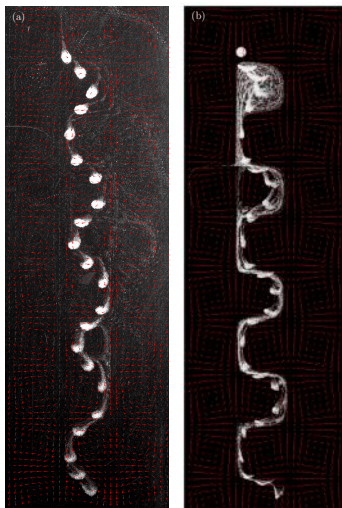
- Vitesse pour chaque particule : $\dot{r}_i = V_{TG} + U_{s,i} + \sum_{j \neq i}^{N_0-1} \dot{r}_j$



Champ de vitesses dans le référentiel du nuage (haut) et dans le référentiel de l'écoulement (bas)



Nuage de particules dans un écoulement



Comparaison des résultats

- Le nuage a tendance à sédimenter le long des régions où le courant est descendant.
→ Le nuage "zigzag".
- Le nuage "pulse" : phase d'expansion et de contraction à travers les régions d'élongations

$N_0 \approx 2500$, $Re_k = 2.9$ et $Re_a \approx 10^{-4}$ -
Expérience (a) et Simulation (b)

Autre méthode possible

Application didactique : Bilan des forces

- On considère le nuage comme une sphère solide
- Bilan des forces : **Équation de Basset–Boussinesq–Oseen**
 Poussée d'Archimède ; Force du fluide sur la particule (accélération du fluide et force de Laplace) ; Force de traînée ; Masse ajoutée ; Force d'histoire

$$\begin{aligned}
 m_p \frac{dv}{dt} &= (m_p - m_f)g + m_f \frac{Du}{Dt} - \frac{4}{3}\pi a^3 j \times B - 6\pi\mu a(v - u - \frac{1}{6}a^2\nabla^2 u) \\
 &\quad - \frac{1}{2}m_f \frac{dv}{dt} + \frac{1}{2}m_f \frac{D}{Dt} \left(u + \frac{1}{10}a^2\nabla^2 u \right) \\
 &\quad - 6\pi\mu a^2 \int_0^t \frac{d(v - u - \frac{1}{6}a^2\nabla^2 u)/d\tau}{\sqrt{\pi\mu(t - \tau)}} d\tau
 \end{aligned}$$

→ À faible Reynolds : la force de traînée domine sur le reste

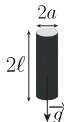
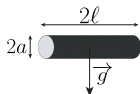
- 1 Introduction
- 2 Parcours universitaire et professionnel
- 3 Mes travaux de recherche**
 - Qu'est-ce-que le régime visqueux ?
 - Nuage de particules dans un écoulement
 - Fibre flexible dans un fluide visqueux au repos**
- 4 Autres activités d'enseignement
- 5 Conclusion

Comment sédimente une fibre rigide ?

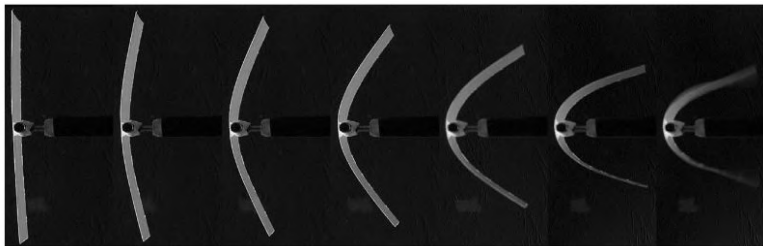
Application didactique : Détermination du coefficient de trainée et comparaison

- Sédimentation de petit cylindre rigide (\perp et \parallel)
→ la surface « vue » par le fluide n'est pas la même.
- Mesure de la vitesse
- Détermination de la force de trainée par bilan des forces : Archimède, Poids et Trainée.
→ Estimation du coefficient de trainée et comparaison.

$$F^{drag} \propto C_{\mu} U 2\ell$$



Comment réagit un objet flexible face à un écoulement ?



Plaque flexible soumise à un écoulement



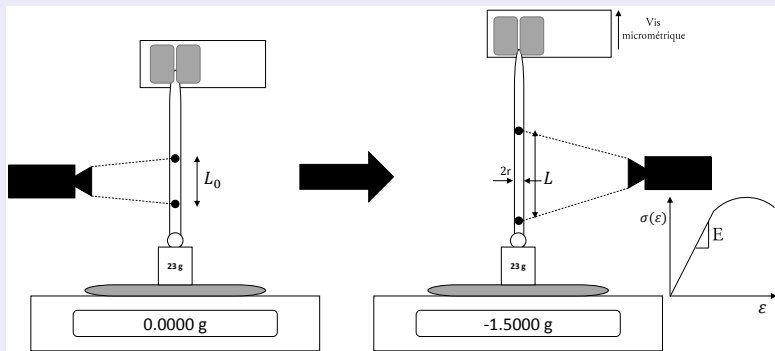
Feuille soumise à un écoulement

Quel paramètre caractérise la rigidité de la fibre ?

Application didactique : Mesure du module d'Young

Relation entre contrainte et déformation :

$$\sigma(\varepsilon) = E \times \varepsilon \text{ avec } \sigma = \frac{mg}{\pi r^2} \text{ et } \varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0}$$



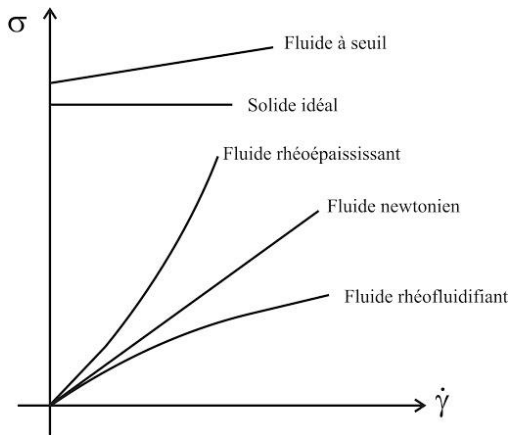
Comment caractériser la viscosité d'un fluide ?

Application didactique :

Principe du rhéomètre

- Définition du taux de cisaillement $\dot{\gamma}$
- Définition de la contrainte de cisaillement σ
- Pour un fluide newtonien :

$$\sigma = \mu(T, P)\dot{\gamma}$$



Sédimentation d'une fibre flexible

Analyse de la situation

- Fluide : ρ_f et μ_f
- Fibre : a , ℓ , ρ_{fibre} et E
- Sédimentation : g

Application didactique : théorème de Π

- Principe : **7 grandeurs - 3 dimensions = 4 paramètres**
- Mise en évidence de 4 paramètres adimensionnés indépendants pour décrire le système :

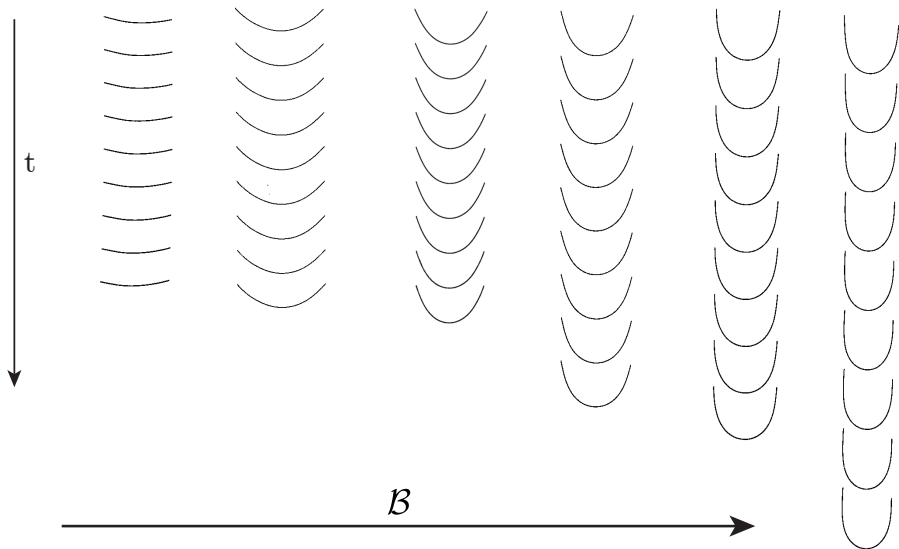
- $\kappa^{-1} = \frac{\ell}{a}$

- Re_ℓ ou Re_a

- $\mathcal{B} = \frac{\text{Gravite}}{\text{Elasticite}}$ ou $\mathcal{V} = \frac{\text{Viscosite}}{\text{Elasticite}}$

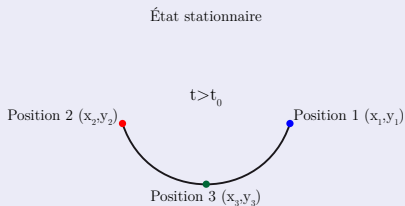
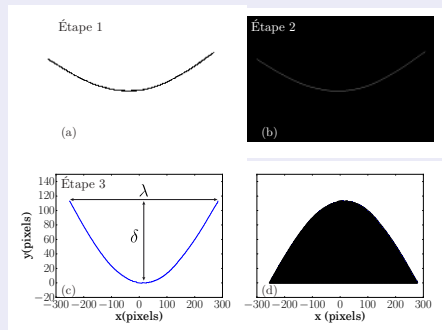
- St

Évolution de la déformation en fonction de \mathcal{B}



Comment caractériser une déformation ?

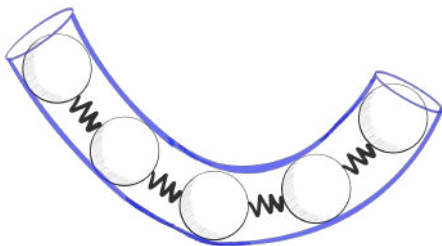
Adaptation didactique : Traitement d'images



Paramètres mesurés

- Amplitude maximale de déformation
- Distance entre les extrémités
- Vitesse de sédimentation

Comment modéliser une fibre ?

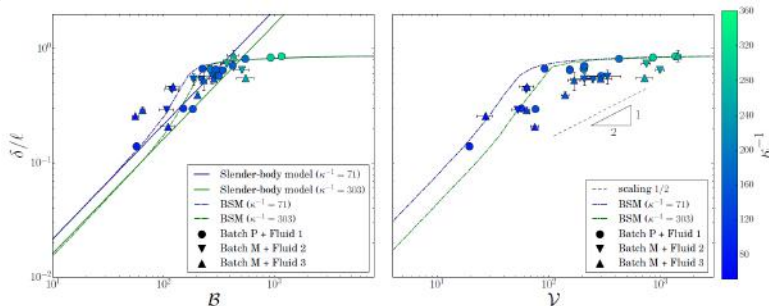


Bead-spring model

Paramètres pris en compte :

- Sédimentation : vitesse de Stokes
- Interaction : contribution des autres sphères connectés à travers leurs champs de vitesse
- Billes connectées par des ressorts : force de rappel et de flexion

Comparaison des résultats



Mise en évidence de **trois régimes** de déformation :

- **Faible déformation** : comparable à une fibre rigide équivalente horizontale
- **Forte déformation** : comparable à une fibre rigide équivalente verticale
- **Régime intermédiaire** : re-configuration élastique

- 1 Introduction
- 2 Parcours universitaire et professionnel
- 3 Mes travaux de recherche
 - Qu'est-ce-que le régime visqueux ?
 - Nuage de particules dans un écoulement
 - Fibre flexible dans un fluide visqueux au repos
- 4 Autres activités d'enseignement
- 5 Conclusion

Rendre la science accessible

Autres activités en lien avec l'enseignement et les sciences

- Activité d'enseignement : monitorat à Polytech Marseille (2015-2018) et lycée général, technologique et professionnel
- Participations à la fête de la science
- Concours CGénial
- Mise en place d'un site dédié à l'enseignement de la physique-chimie : marchettibenjamin.wordpress.com

- 1 Introduction
- 2 Parcours universitaire et professionnel
- 3 Mes travaux de recherche
 - Qu'est-ce-que le régime visqueux ?
 - Nuage de particules dans un écoulement
 - Fibre flexible dans un fluide visqueux au repos
- 4 Autres activités d'enseignement
- 5 Conclusion

Conclusion

- Applications didactiques expérimentales et numériques variées
- Contextualisation et présentation des problématiques présentes dans le monde de la recherche
- Démarche scientifique
- Pour chaque application expérimentale : calculs des incertitudes et mise en évidence des sources d'erreurs