



le 13 Juillet 2005

Étude et Modélisation de l'orientation de fibres verres dans des thermoplastiques injectés

Alexandra MEGALLY

sous la direction de

**Michel VINCENT
Patrice LAURE & Thierry COUPEZ**

Contexte de l'étude

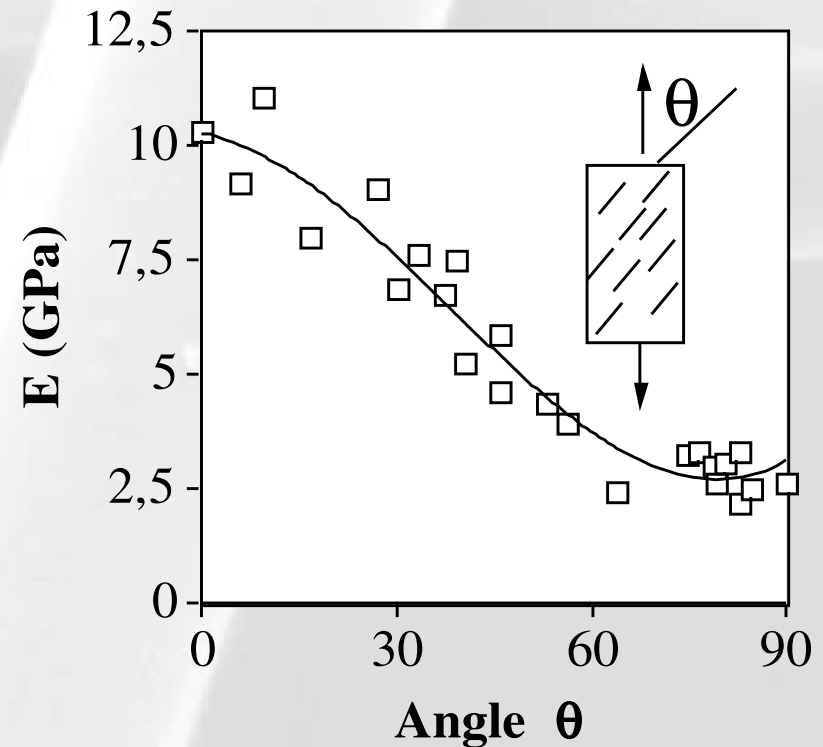
- Composite thermoplastique renforcé de fibres verres longues
 - Application structurelles : automobile, sport et loisirs
 - Granulé mis en forme avec les procédés conventionnels
 - Pièces complexes avec des propriétés mécaniques améliorées
 - *Energie à la rupture X 3 avec ajout des fibres*



Carter sur moteur



Support Batterie

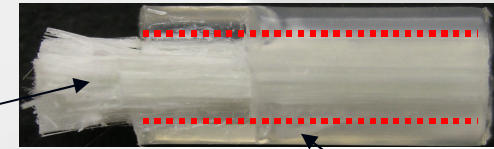


Problématique

- Propriétés mécaniques d'une structure ↔ Orientation du renforts
- Moulage par Injection

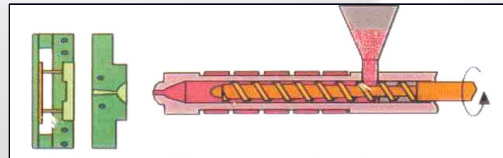


Mèches de fibres



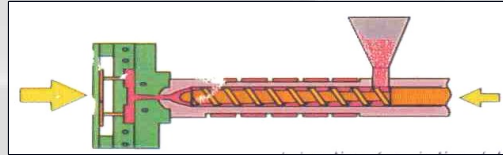
Polymères

1. Plastification



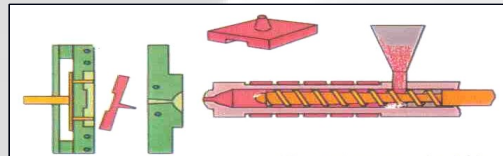
Casse des fibres

2. Remplissage et compactage



*Écoulement oriente les fibres
Les fibres modifient le profil de vitesse*

3. Refroidissement et éjection



*Propriétés mécaniques →
Orientation et caractéristiques
des fibres*



Orientation de fibres est un problème complexe

Prédiction des propriétés mécaniques

Objectifs de l'étude

Étude et modélisation de l'orientation de fibres de verres dans des thermoplastiques injectés

➤ Approche expérimentale

Observer et quantifier les phénomènes d'orientation

→ *Meilleure compréhension des mécanismes d'orientation*

➤ Approche numérique

Mise au point d'un outils de simulation directe de l'orientation de fibres en écoulement

→ *Compréhension de la physique de l'orientation*

→ *Outils d'identification de paramètres de loi de comportement*

Plan de l'exposé

1. Caractérisation de l'orientation et de la structure des fibres dans une pièce injectée

1.1 Mesure de la distribution de longueur dans une pièce,

1.2 Observation de pièces injectées

1.3 Technique de mesure de l'orientation

1.4 Mesure de la distribution d'orientation dans une pièce

1.5 Conclusions

2. Les modèles physiques de comportement en orientation et en rhéologie

2.1 Modélisation de l'orientation d'une population de fibres

2.2 Modélisation du comportement rhéologique

3. Étude par simulation numérique directe de la dynamique d'orientation des fibres en écoulement

3.1 Présentation du modèle

3.2 Validation du modèle

3.3 Application du modèle à l'étude d'une population de fibres

3.4 Étude des paramètres des lois de comportement

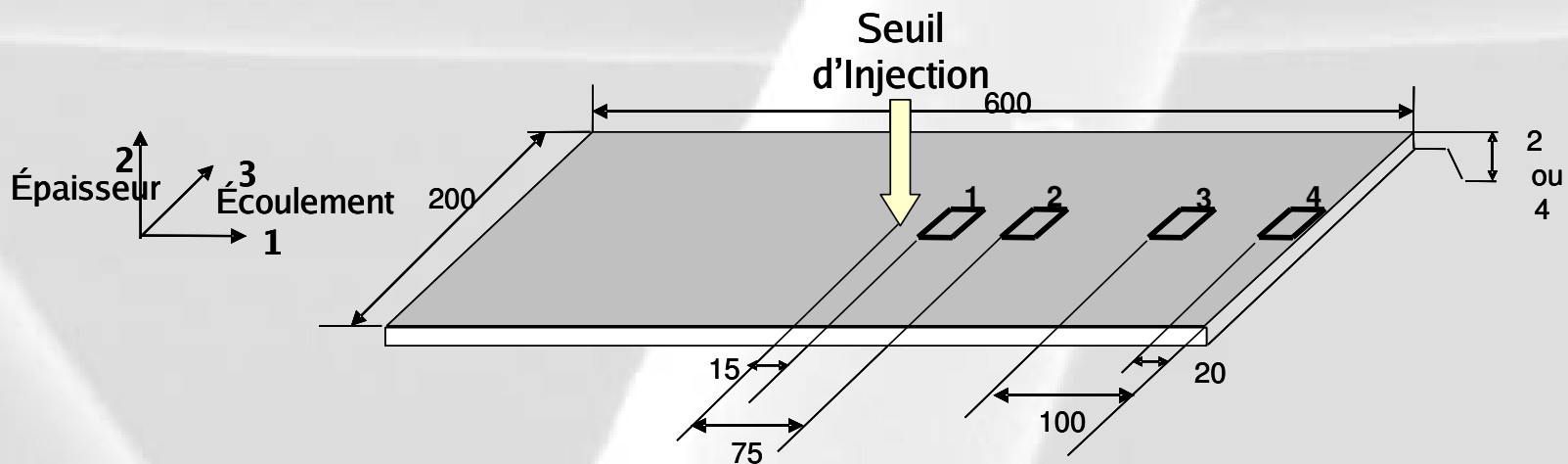
4. Conclusions et Perspectives

I. Étude de l'orientation dans une plaque injectée

- **Objectifs** : Caractériser l'orientation et la structure des fibres dans une plaque injectée

- **Pièce d'étude et Matériaux**

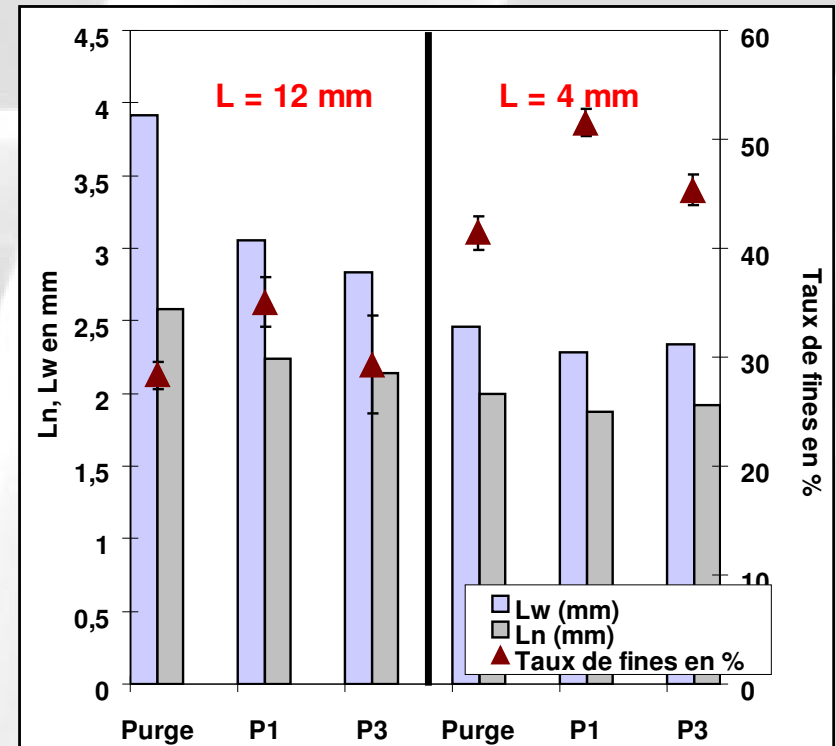
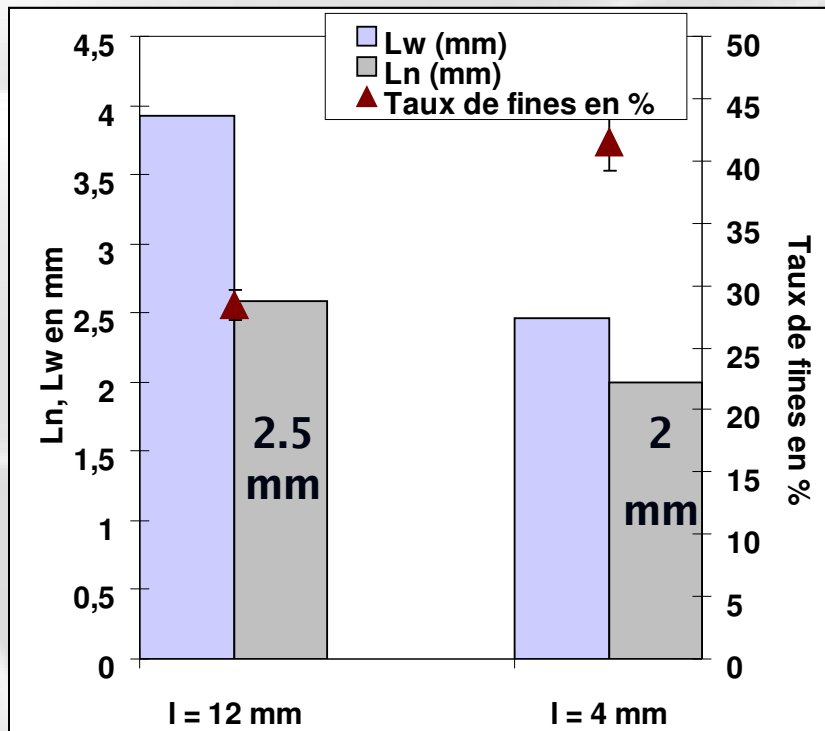
- Géométrie simple : une plaque d'épaisseur modifiable (1.8 et 3.6 mm)
- Polypropylène renforcé de fibres de verres longues
 - ❖ *Concentration : 10 % et 30% en masse*
 - ❖ *Longueur initiale de fibres : 4 et 12 mm*



1.1 Mesure de la distribution de longueur

■ Méthode : Pyrolyse des échantillons

- Mesure du % massique de fibres < à 1 mm
- Répartition de la longueur des fibres par analyse d'images

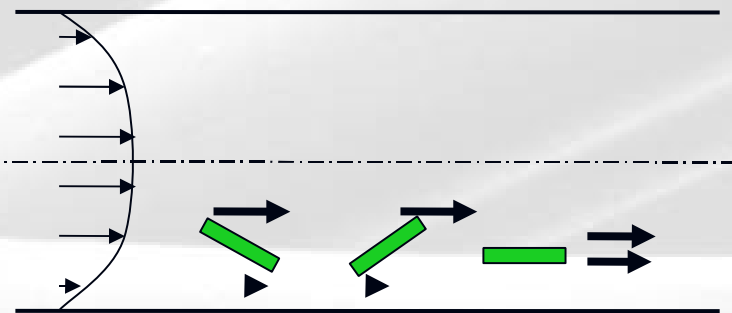


Multi population de longueur de fibres → 50% des fibres < 1 mm

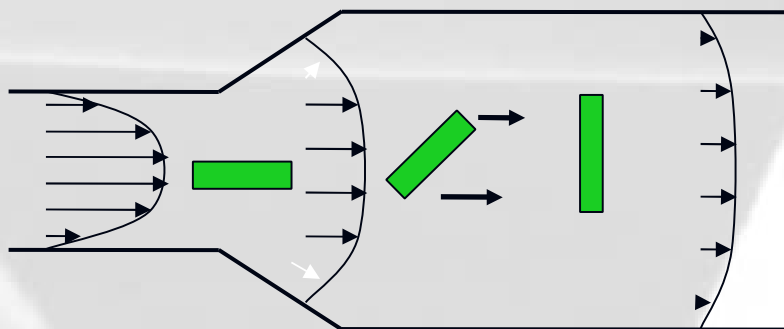
La casse des fibres se fait préférentiellement dans la vis d'injection

Mécanisme d'orientation

- Phénomènes d'orientation dans des écoulements simples



Ecoulement de cisaillement



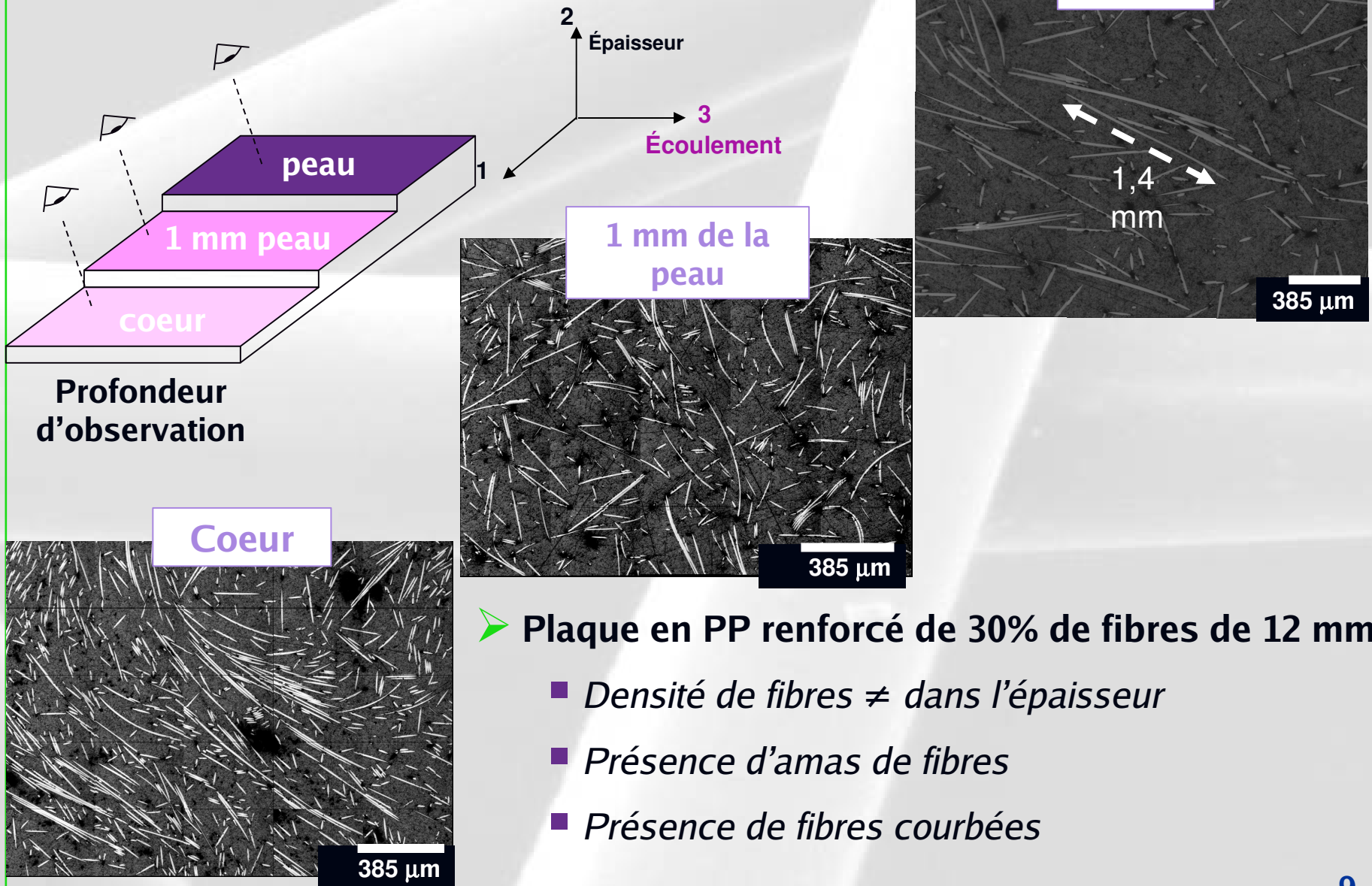
Ecoulement élongationnel



Moule transparent

Injection PS + Fibres métalliques

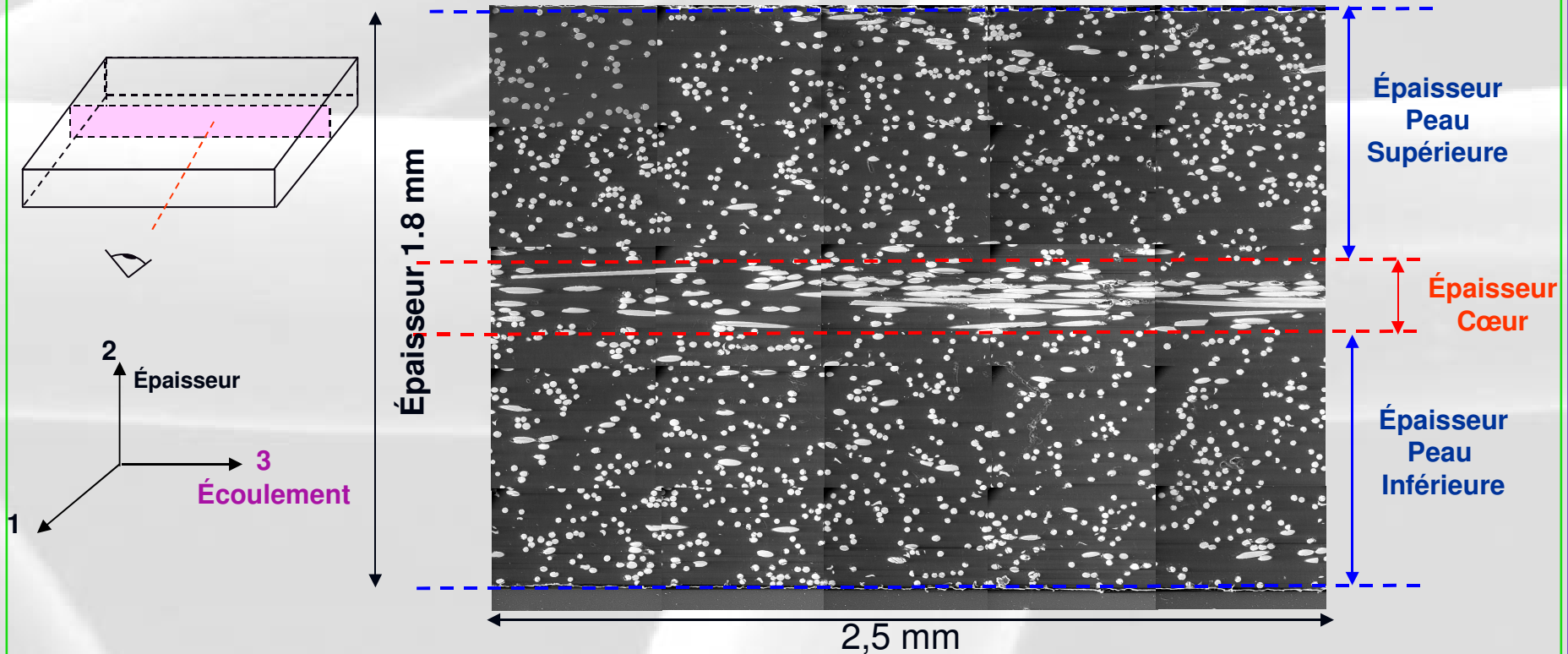
1.2 Observation des fibres sur la plaque



1.2 Observations des fibres en coupe

➤ Plaque en PP renforcé de 30% de fibres de 12 mm

■ Observation MEB d'une coupe perpendiculaire à la direction de l'écoulement

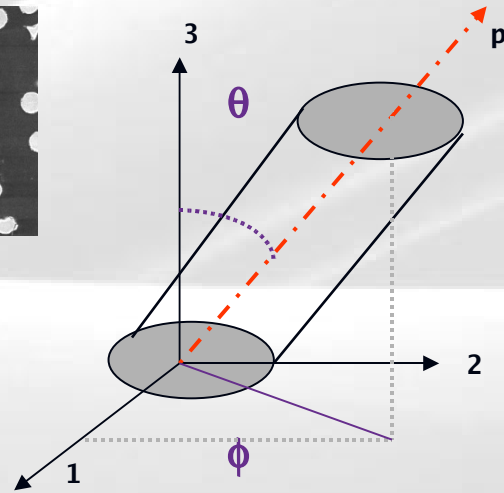
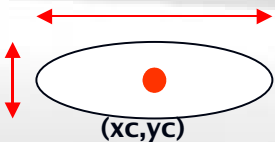
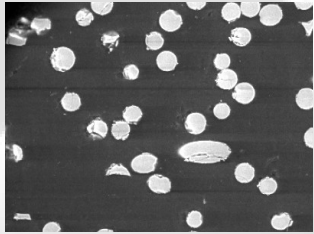


Structure Cœur Peau classiquement observée dans les composites

TP fibres courtes

1.3 Technique de mesure de l'orientation

Techniques de mesures surfaciques sur des coupes micropolies

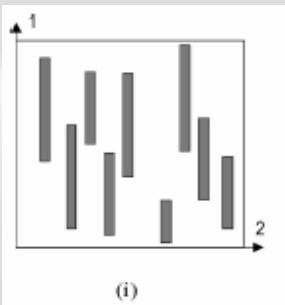


Analyse d'image : **Technique des moments d'inertie**

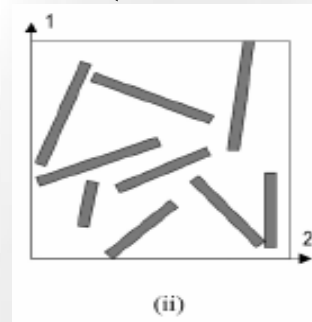
→ Dimension de l'ellipse = orientation 1 fibre

Outils statistique : Tenseur d'orientation a_2

$$a_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n a_{ij}^k = \frac{1}{n} \left(\sum_{k=1}^n p_i^k \cdot p_j^k \right)$$



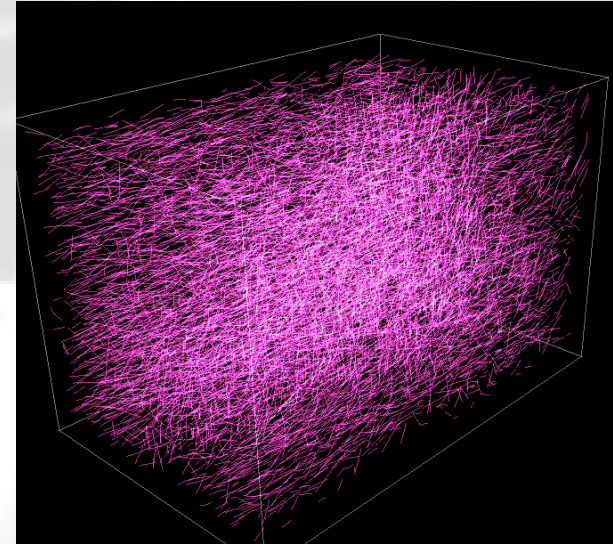
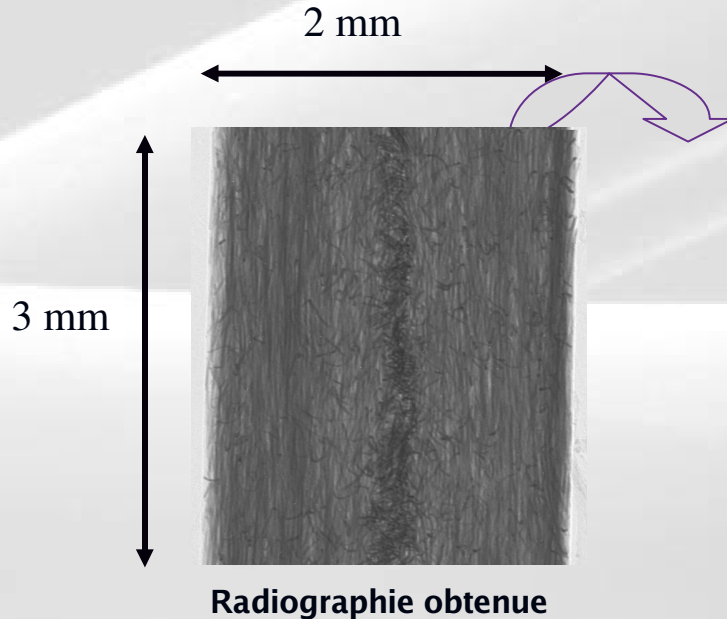
$$a_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$



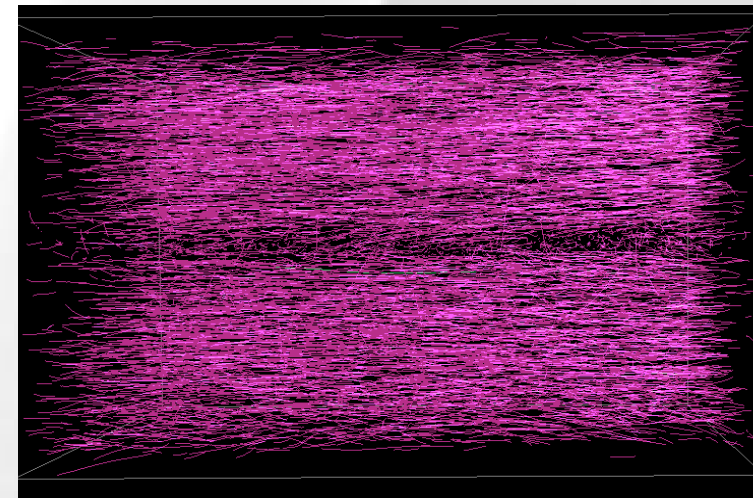
$$a_2 = \begin{pmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{pmatrix}$$

1.3 Technique de mesure de l'orientation

■ Techniques 3D de micro tomographie par rayon X



- Technique récente limitée par la taille d'échantillon
- Orientation globale dans le volume
- Information sur la courbure des fibres

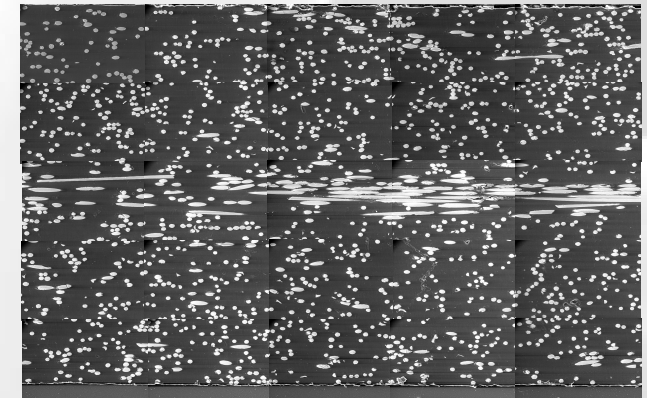
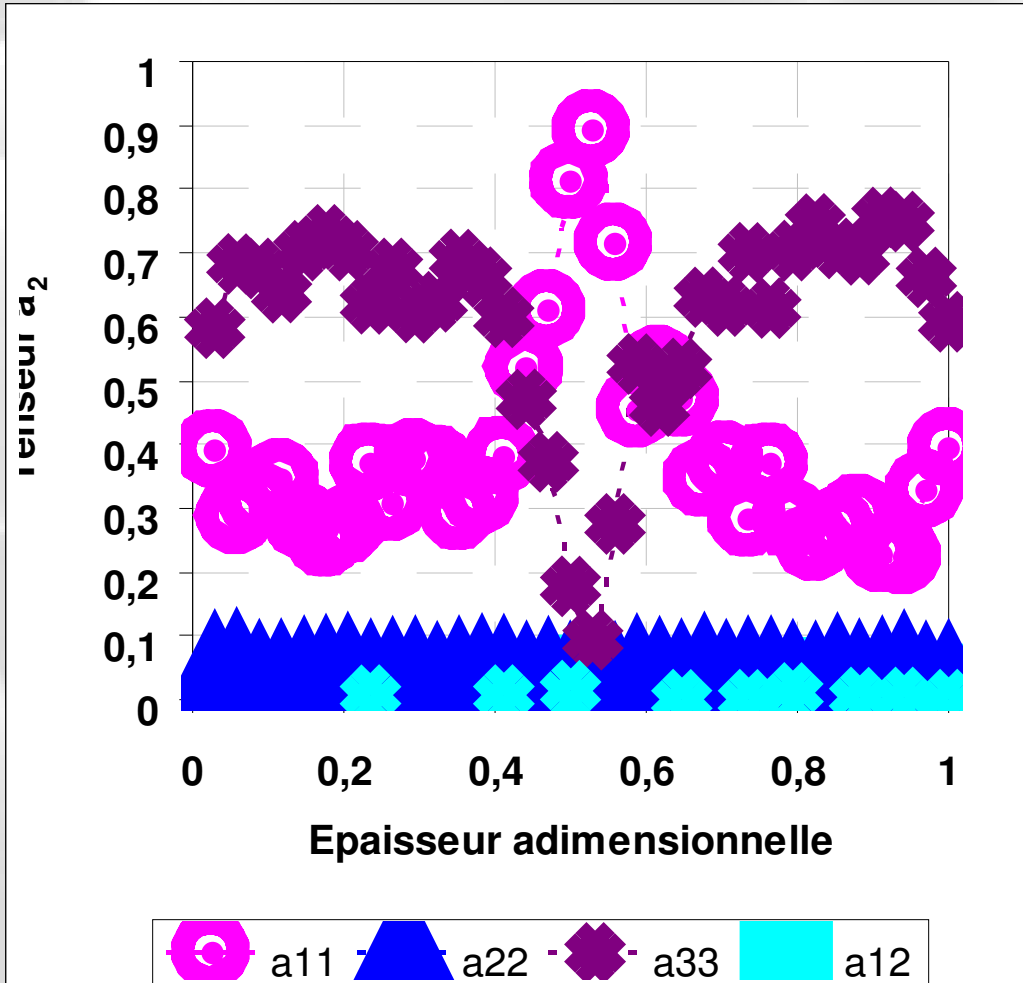
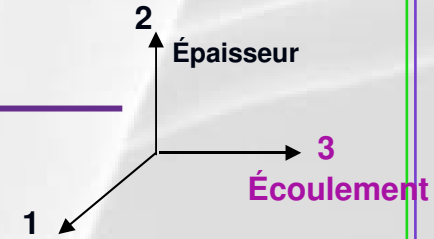


GFL 4 mm 30 % 500 000 fibres

1.3 Technique de mesure de l'orientation

■ Tracé type : Composantes du tenseur d'orientation a_2

➤ *Orientation moyenne en fonction de l'épaisseur*



• $a_{22} \ll a_{11}$ et $a_{22} \ll a_{33}$

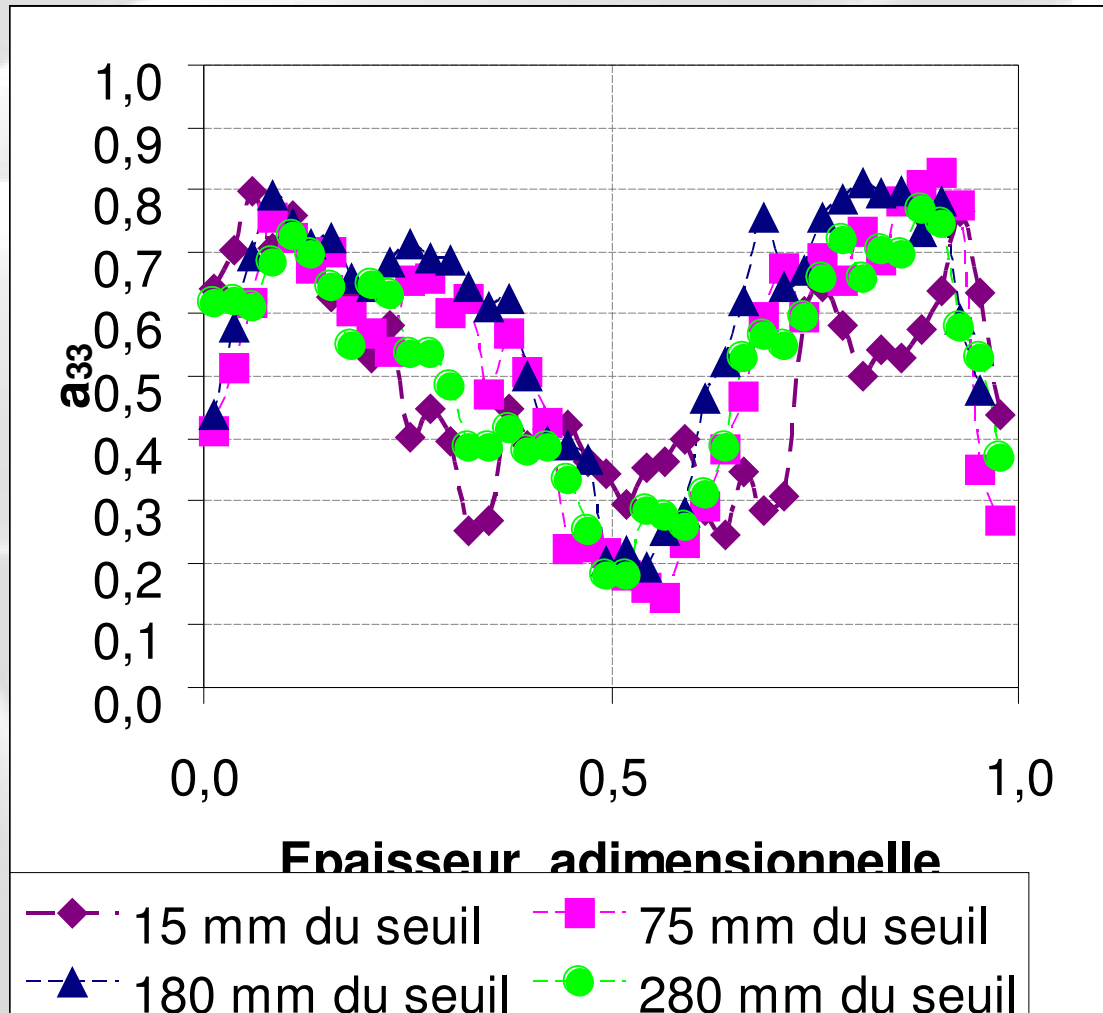
→ *Orientation dans le plan*

• $a_{11} + a_{22} + a_{33} = 1$

→ a_{33} = *représentation quantitative de l'orientation*

Mesure de la distribution d'orientation

- Influence de la position le long du chemin d'écoulement sur l'orientation
 - Plaque de 3,6 mm injectée en PP renforcé de 30% de fibres de 12 mm

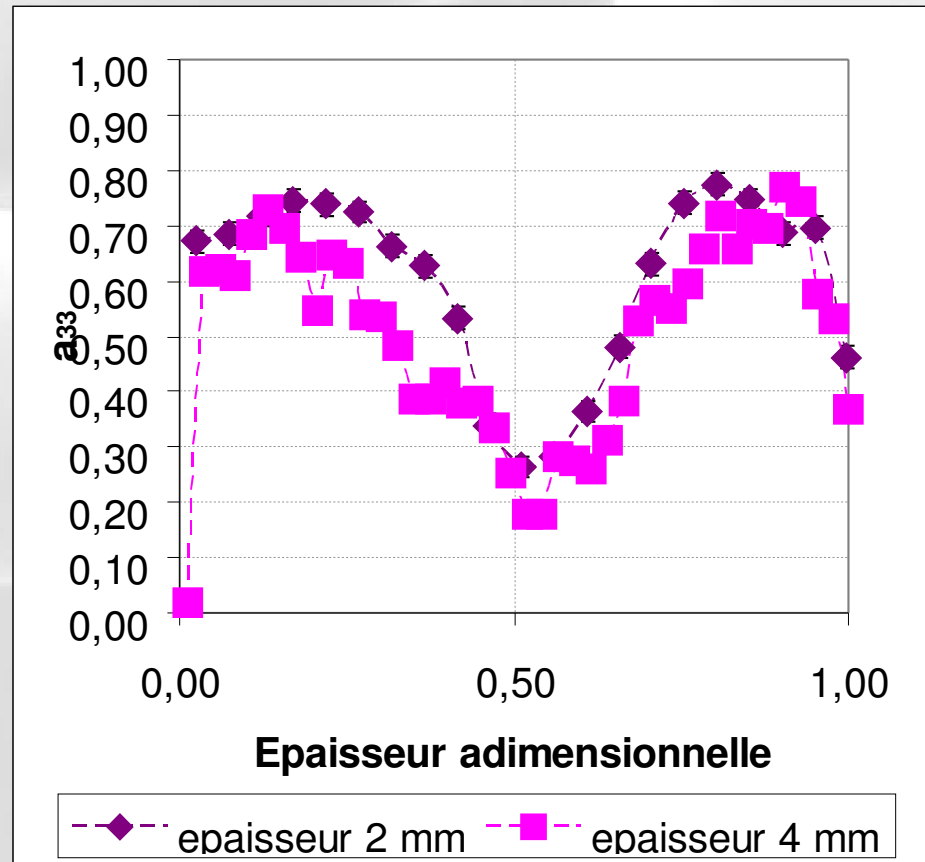
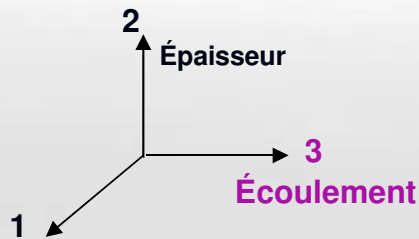


- *Structure coeur-peau mal définie au niveau du seuil d'injection*
- *Peu d'influence de la position de l'échantillon sur l'orientation*

Mesure de la distribution d'orientation

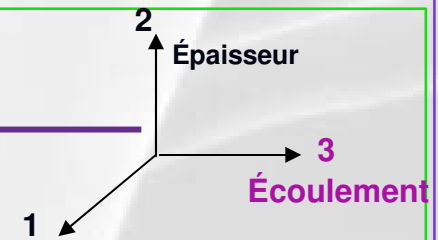
■ Influence de l'épaisseur de la plaque : 2 et 4 mm

➤ Plaque en PP renforcé de 30% de fibres de 12 mm



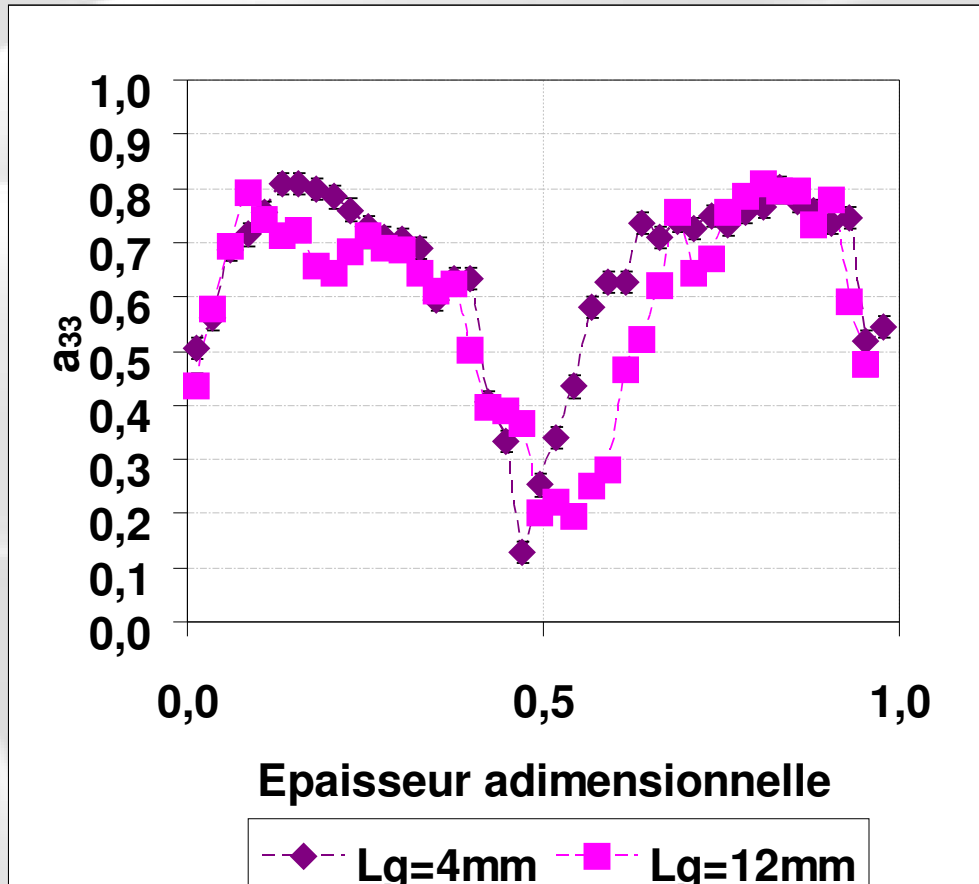
Épaisseur de la plaque semble avoir une influence sur l'épaisseur de la zone de coeur

Mesure de la distribution d'orientation



➤ Influence de la longueur des fibres

- Polypropylène renforcé à 30 % de fibres initialement de 4 mm et de 12 mm



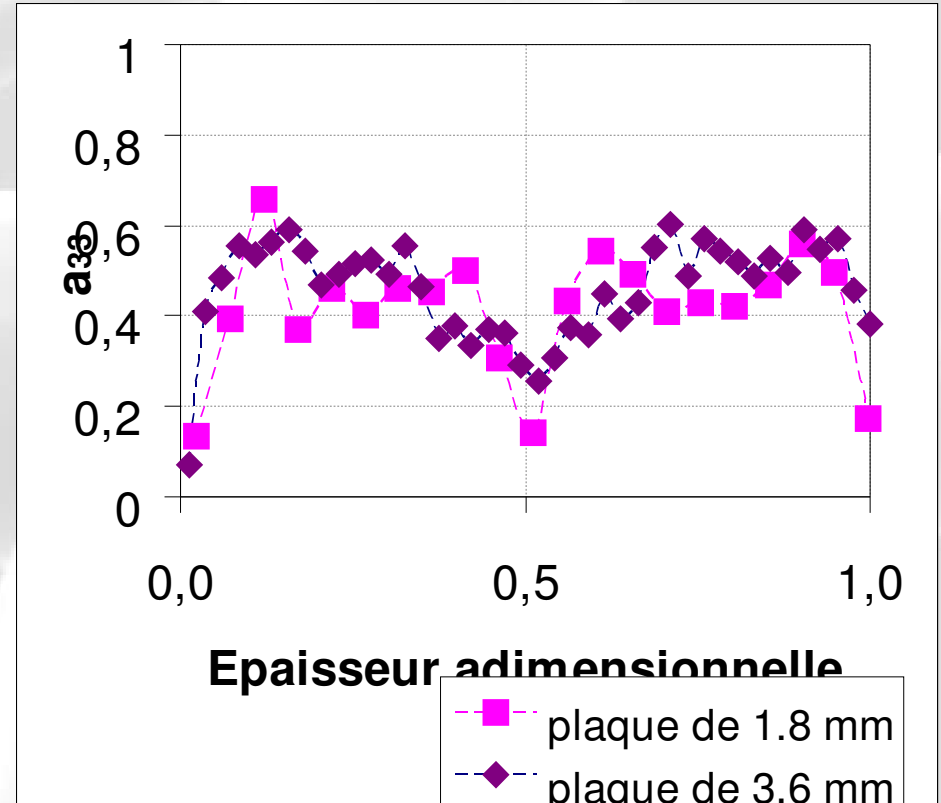
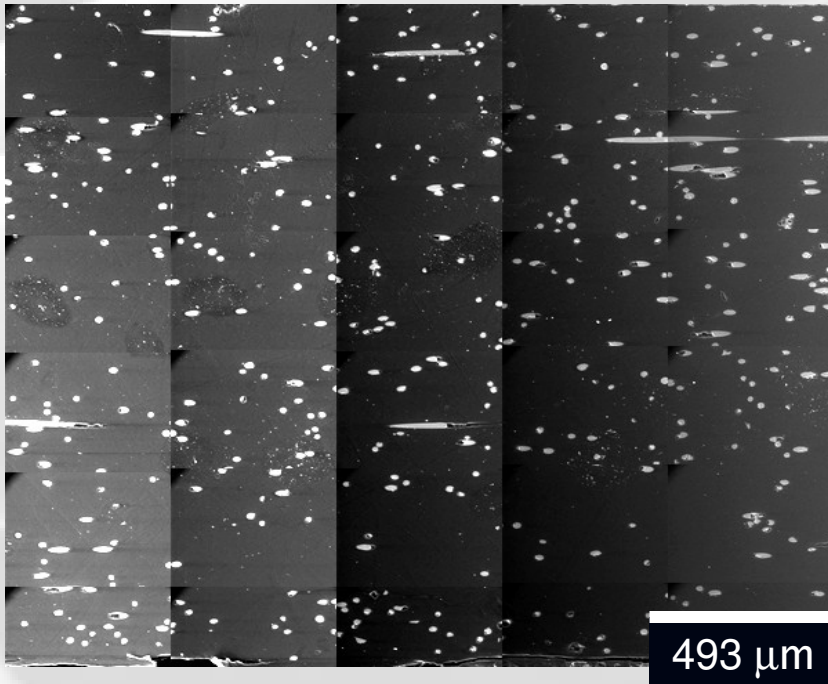
- Ln = 2.2 mm pour GLF 12 mm
30% de fibres < à 1 mm
- Ln = 2 mm pour GLF 4mm
45% de fibres < 1 mm

Quelle que soit l'épaisseur des plaques, on observe une zone de cœur moins marquée et plus large pour une distribution de longueur plus grande

Mesure de la distribution d'orientation

➤ Influence de la concentration de fibres

- Polypropylène renforcé à 10 % de fibres de 12 mm (milieu de plaque)



Pas de structure cœur peau

Valeur de $a_{33} \sim 0.5$, une structure cœur-peau légèrement définie

Conclusions sur l'étude expérimentale

Caractérisation de l'évolution de la structure des fibres lors de l'injection d'une plaque en polypropylène.

■ Une distribution de longueur des fibres

✓ *Fibres cassées principalement pendant la phase de plastification*

■ Présence d'amas de fibres

✓ *Souvenir des méches de fibres ?*

■ Mesure de l'orientation des fibres

✓ **Technique d'observation optique sur des coupes micro polies**

✓ Structure Cœur – Peau pour matériaux chargé à 30%

❖ *Effet de la concentration*

❖ *Longueur initiale des fibres de 4mm → 12 mm : effet sur le coeur*

❖ *Influence peu significative des paramètres procédés (vitesse d'injection et Température moule)*



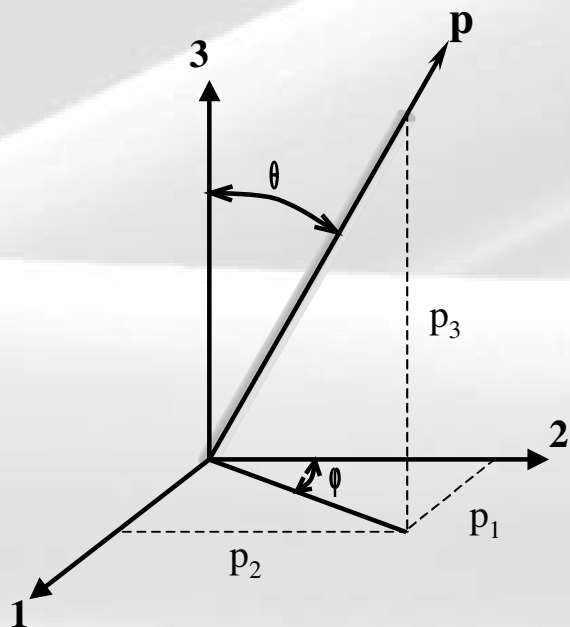
Les phénomènes d'orientation sont complexes

Plan de l'exposé

1. Caractérisation de l'orientation et de la structure des fibres dans une pièce injectée
 - 1.1 Mesure de la distribution de longueur dans une pièce,
 - 1.2 Observation de pièces injectées
 - 1.3 Technique de mesure de l'orientation
 - 1.4 Mesure de la distribution d'orientation dans une pièce
 - 1.5 Conclusions
2. Les modèles physiques de comportement en orientation et en rhéologie
 - 2.1 Modélisation de l'orientation d'une population de fibres
 - 2.2 Modélisation du comportement rhéologique
3. Étude par simulation numérique directe de la dynamique d'orientation des fibres en écoulement
 - 3.1 Présentation du modèle
 - 3.2 Validation du modèle
 - 3.3 Application du modèle à l'étude d'une population de fibres
 - 3.4 Étude des paramètres des lois de comportement
4. Conclusions et Perspectives

Modélisation de l'orientation

■ Mouvement d'une particule en écoulement [Jeffery 1922]



- Écoulement Newtonien
- Particule rigide
- Particule petite devant les dimensions de l'écoulement

➡ Équation d'évolution en \underline{p} :

$$\dot{\underline{p}} = \frac{d\underline{p}}{dt} = \underline{\Omega} \underline{p} + \lambda \left(\underline{\dot{\varepsilon}} \underline{p} - \left(\underline{\varepsilon} : \left[\underline{p} \otimes \underline{p} \right] \right) \underline{p} \right)$$

↓
Tenseur de rotation

↓
Tenseur des vitesses de déformation

$$\lambda = \frac{\beta^2 - 1}{\beta^2 + 1} \quad \beta = \frac{L}{D}$$

Modélisation de l'orientation d'une population de fibres

■ Fonction de distribution de l'orientation : $\Psi(p, t)$

■ Description plus concise de l'orientation [Advani et al. 1987]

$$a_{ij} = \int_p \Psi(p) p_i p_j dp \qquad a_{ijkl} = \int_p \Psi(p) p_i p_j p_k p_l dp$$

■ Modèle phénoménologique de Folgar et Tucker (1984)

Modèle de Jeffery

Tenseur des vitesses de déformation

Coefficient de diffusion

$$\frac{Da_2}{Dt} = \Omega a_2 - a_2 \Omega + \lambda(\varepsilon a_2 + a_2 \varepsilon - 2\varepsilon : a_4)$$

$$+ 2C_i \bar{\varepsilon} (I_d - 3a_2)$$

Tenseur d'orientation

Tenseur de rotation

Intervention d'une équation de fermeture (1)

Terme d'interaction entre les fibres (2)

$$\left. \begin{aligned} a_2 &= f(a_4) \\ a_4 &= f(a_6) \\ a_{2n} &= f(a_{2n+2}) \end{aligned} \right\}$$

Approximation de Fermeture

$$a_4 = F(a_2) ?$$

Valeur de Ci ?

Modélisation de l'orientation d'une population de fibres

■ Les équations de fermeture

✓ Expression : $\underline{a_4} = f(\underline{a_2})$

Équation de fermeture	Domaine de validité
Linéaire	Orientation isotrope
Quadratique	Orientation unidirectionnelle
Hybride	Fibres unidirectionnelles et alignées
Orthotrope	Valeur de C_i et β

Peut fournir des résultats non physiques

Ne respecte pas toutes les conditions de symétrie de $\underline{a_4}$

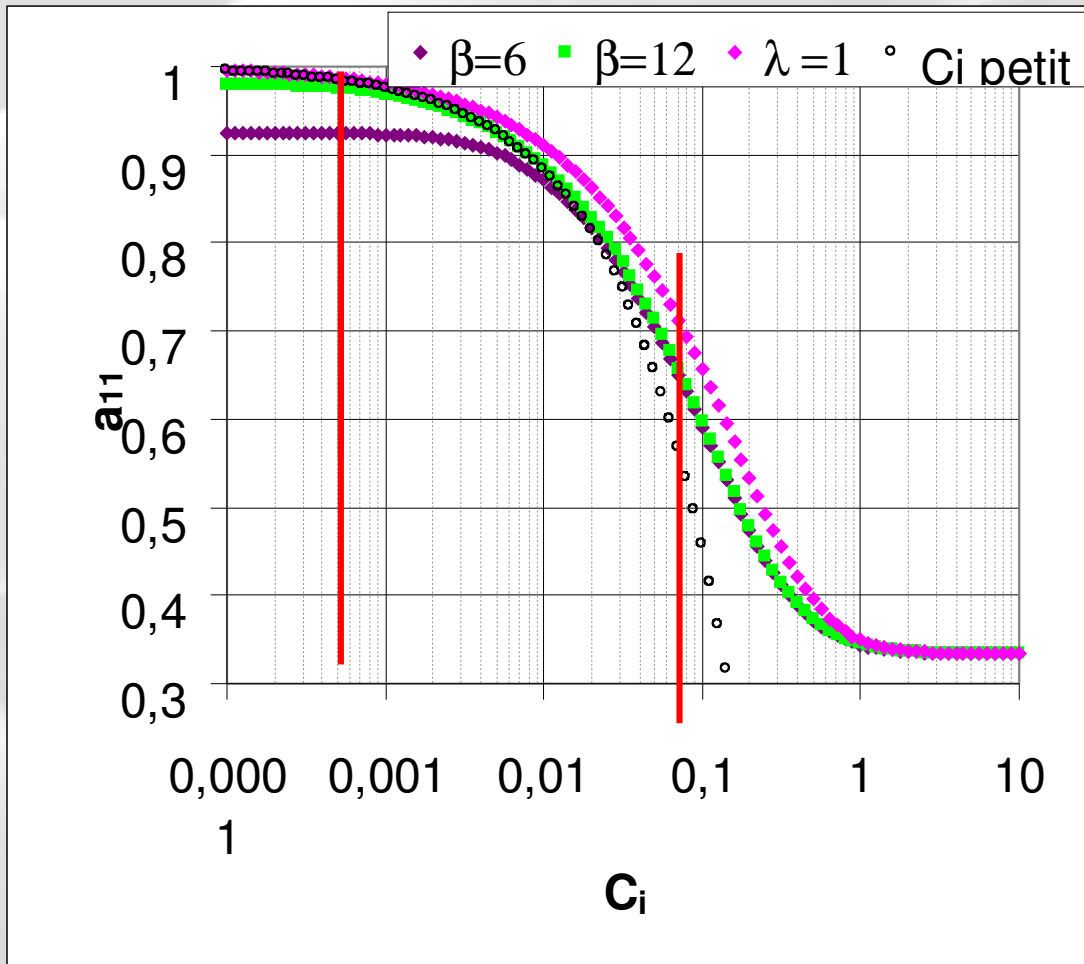
Interpolation des équations quadratique et linéaire



Choix de l'approximation ?

Modélisation de l'orientation

■ Approche phénoménologique : le coefficient d'interaction C_i



Résolution analytique de FT avec fermeture quadratique

Mesures expérimentales

- *Folgar et Tucker* : Fluide Newtonien soumis à écoulement de cisaillement simple, $10^{-2} < C_i < 10^{-4}$
- *Bay* : mesure sur pièce injectée
→ Contradiction avec les mesures de Folgar et Tucker
- *Ranganatha et Advani* : C_i fonction de la distance entre particules

Mesures numériques

- Simulation directe : *Yamane, Phan-Thien*

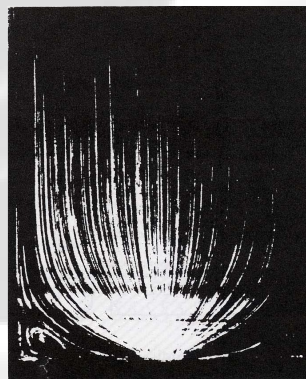
→ Coefficient d'interaction

Comportement rhéologique d'une suspension de fibres

■ Constat expérimental

- relation rhéologie ↔ orientation
- Les fibres modifient l'écoulement

Lignes de courant dans une contraction



Matrice non chargée
Lipscomb, 1988



Matrice chargée à 0.045%
en volume

■ Loi de comportement

$$\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{\sigma}}_{\text{fluide}} + \underline{\underline{\sigma}}_{\text{fibres}}$$

Contribution du fluide

Contribution des fibres

$$\underline{\underline{\sigma}} = -p \underline{\underline{I_d}} + 2\underline{\underline{\eta}} \underline{\underline{\varepsilon(v)}} + 2\underline{\underline{\eta}} N_p (\underline{\underline{\varepsilon(v)}} : \underline{\underline{a_4}})$$

Viscosité du
fluide

Quantifie la résistance de
la suspension lors d'une
solicitation
élongationnelle

Équation de fermeture

$$N_p = f(\beta, \phi)$$

Détermination
de N_p ?

Bilan des modèles de comportement

Les difficultés liées à la modélisation de produits chargés de fibres

ORIENTATION

Valeur du Coefficient d'interaction C_i ?

Choix de l'approximation de fermeture ?



RHEOLOGIE

Détermination du paramètre rhéologique N_p

Approche de simulation directe

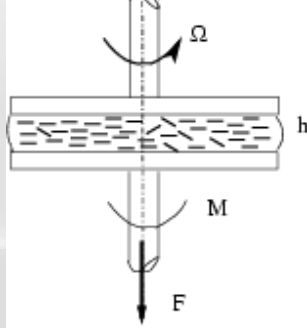
Plan de l'exposé

1. Caractérisation de l'orientation et de la structure des fibres dans une pièce injectée
 - 1.1 Mesure de la distribution de longueur dans une pièce,
 - 1.2 Observation de pièces injectées
 - 1.3 Technique de mesure de l'orientation
 - 1.4 Mesure de la distribution d'orientation dans une pièce
 - 1.5 Conclusions
2. Les modèles physiques de comportement en orientation et en rhéologie
 - 2.2 Modélisation de l'orientation d'une population de fibres
 - 2.3 Modélisation du comportement rhéologique
3. Étude par simulation numérique directe de la dynamique d'orientation des fibres en écoulement
 - 3.1 Présentation du modèle
 - 3.2 Validation du modèle
 - 3.3 Application du modèle à l'étude d'une population de fibres
 - 3.4 Étude des paramètres des lois de comportement
4. Conclusions et Perspectives

Simulation directe du mouvement de fibres

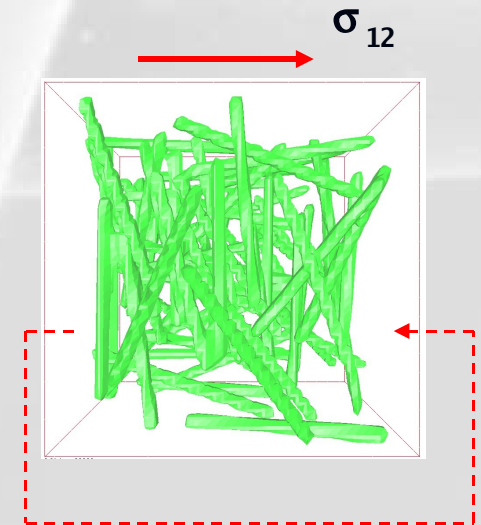
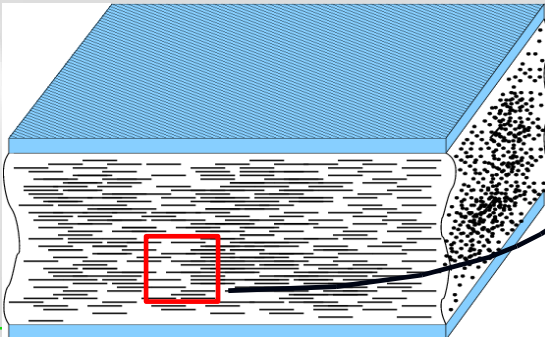
- Mise au point d'un outils de simulation directe
 - Simulation des mécanismes d'orientation
 - ❖ à l'échelle des fibres dans un VER
 - ❖ Interactions entre les particules : couplage fluide – structure
 - Choix du VER

h petit, γ constant



Rhéologie numérique

Homogénéisation volumique

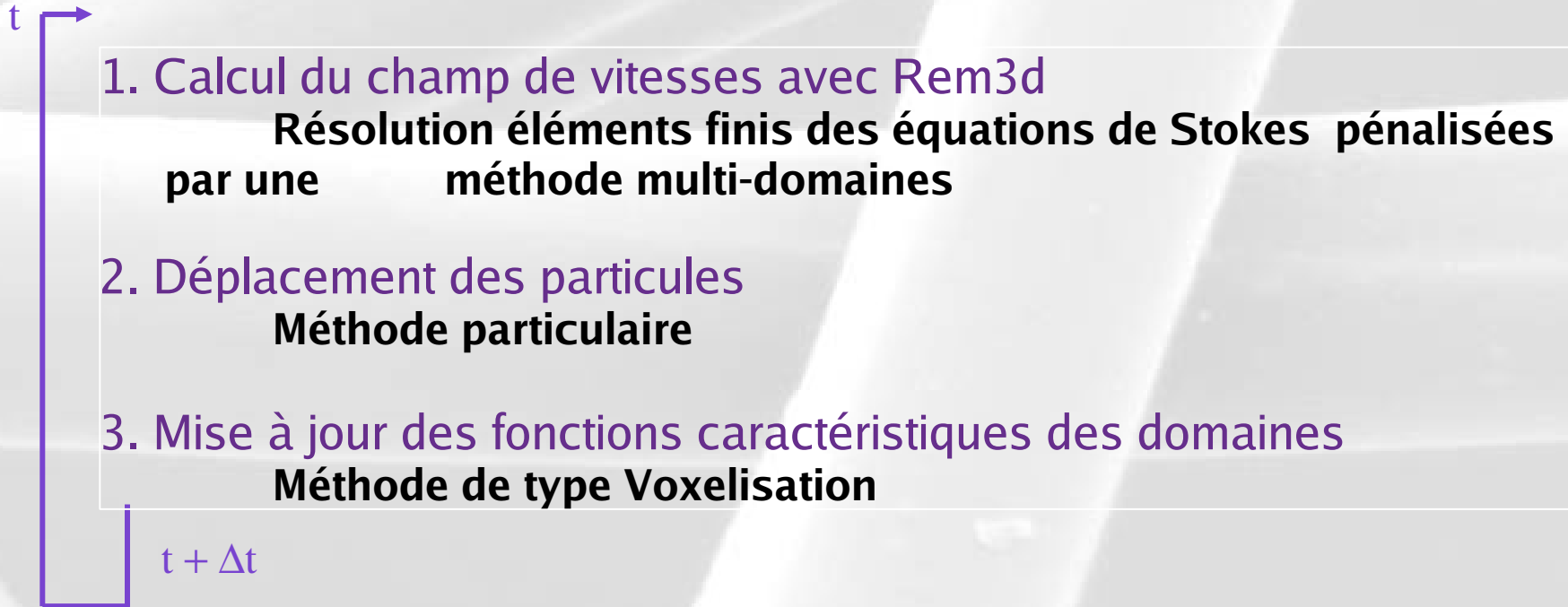


Condition aux limites périodiques

Principe du calcul

■ Trois étapes

Algorithme de résolution :



Approche numérique similaire à celle adoptée par Glowinski & Joseph's [Glowinski 1999]

(*Fictitious domain method for particulate flows*)

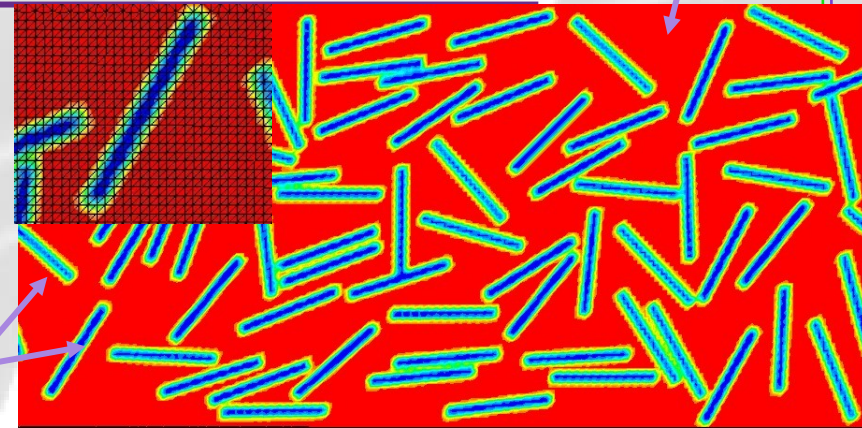
Calcul du champ de vitesse (1)

1) Fonctions caractéristiques

$$1_{\Omega_j}(x, t) = \begin{cases} 1 & x \in \Omega_j \\ 0 & x \notin \Omega_j \end{cases}$$

$j = \text{fluide ou solide (fibre)}$

Domaine fibre



Domaine fluide

$$\Omega_s = \bigcup_i^n \Omega_{si}$$

2) Champ de vitesse

$$\nabla \sigma = 0$$

$$\int_{\Omega} 1_{\Omega_f} 2\eta \varepsilon(u) : \varepsilon(v) d\Omega + \int_{\Omega} 1_{\Omega_s} \mathbf{r} \varepsilon(u) : \varepsilon(v) d\Omega$$

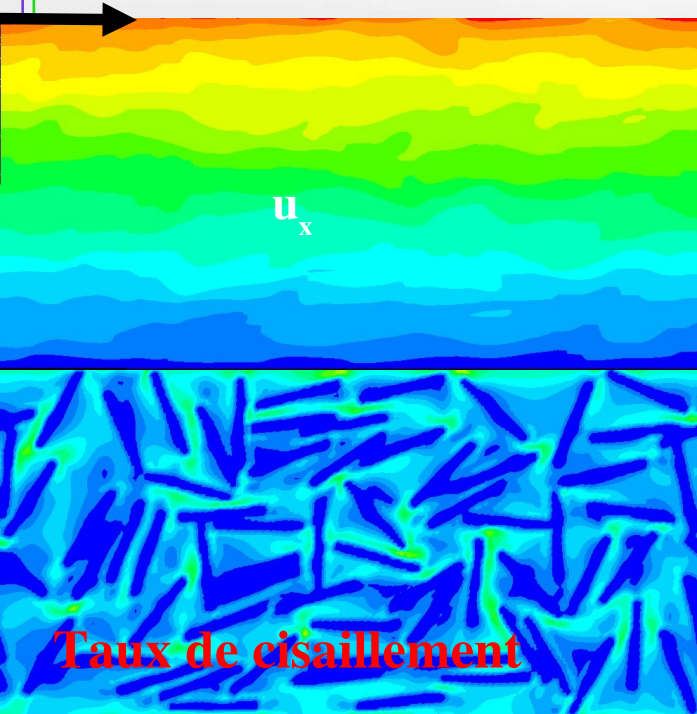
$$- \int_{\Omega} p \nabla \cdot v d\Omega = 0$$

Pénalisation $\sim 10^3 \eta$

$$\varepsilon(u) = 0$$

$$\nabla u = 0$$

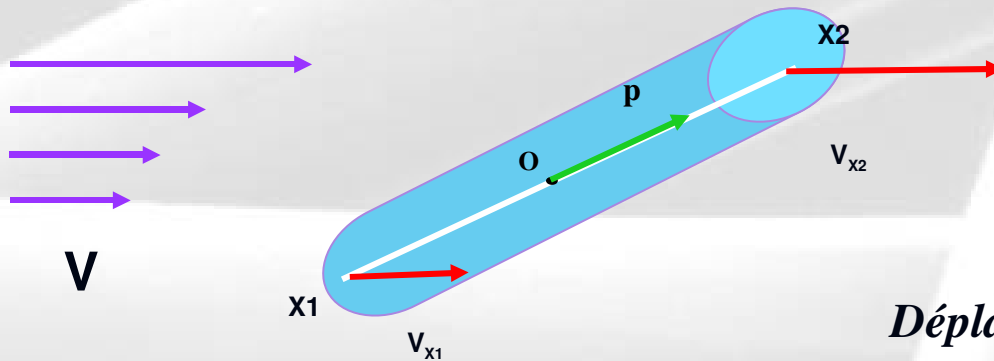
$$- \int_{\Omega} q \nabla \cdot u d\Omega = 0$$



Taux de cisaillement

Calcul du déplacement des particules (2)

■ Méthode particulaire



$$X_i(t + \Delta t) = X_i + V_{X_i} \Delta t$$

Déplacement Lagrangien de la position des deux extrémités de chaque fibre

■ Mouvement rigide

$$\vec{p} = \frac{\overrightarrow{X_2 X_1}}{\|\overrightarrow{X_2 X_1}\|} \quad \text{Vecteur orientation}$$

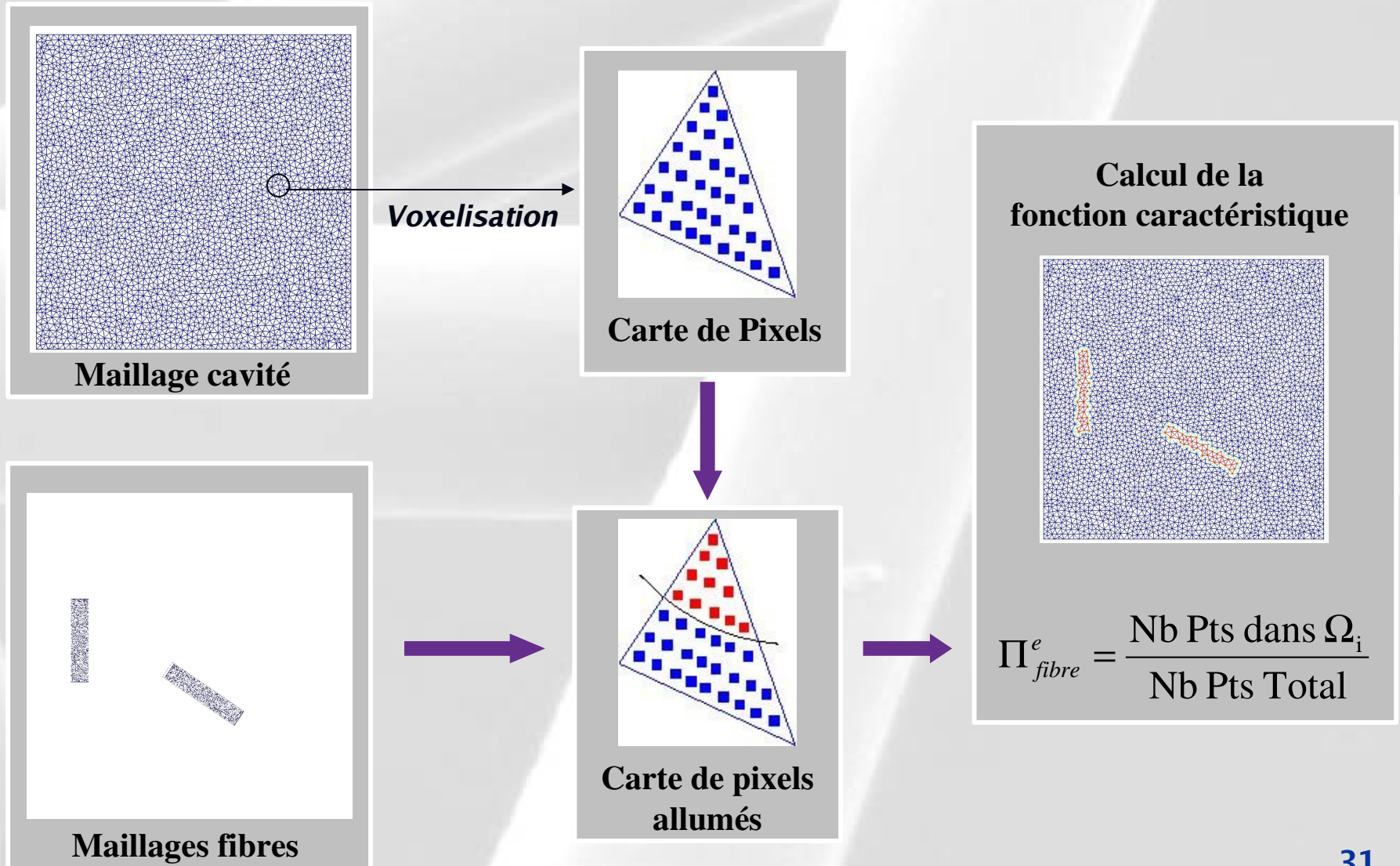
$$O = \frac{X_1 + X_2}{2} \quad \text{Centre de la fibre}$$

Avantages

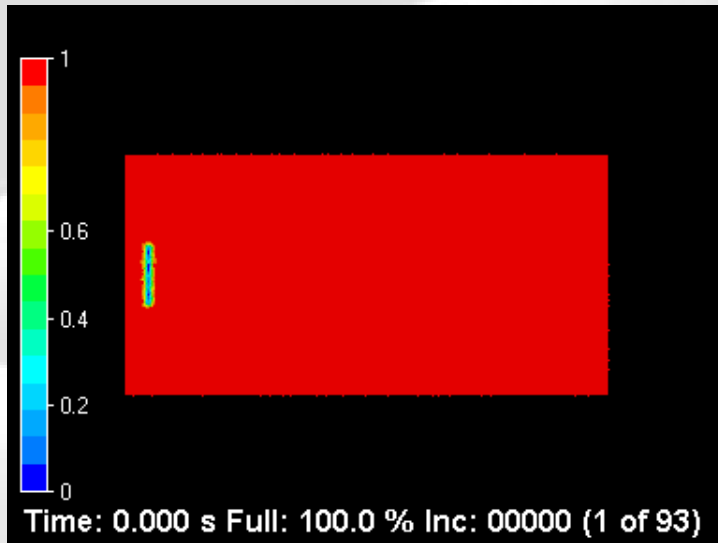
- *Mouvement rigide parfait*
- *Conservation de la longueur des fibres*
- *Pas de diffusion numérique*

Mise à jour des fonctions caractéristiques (3)

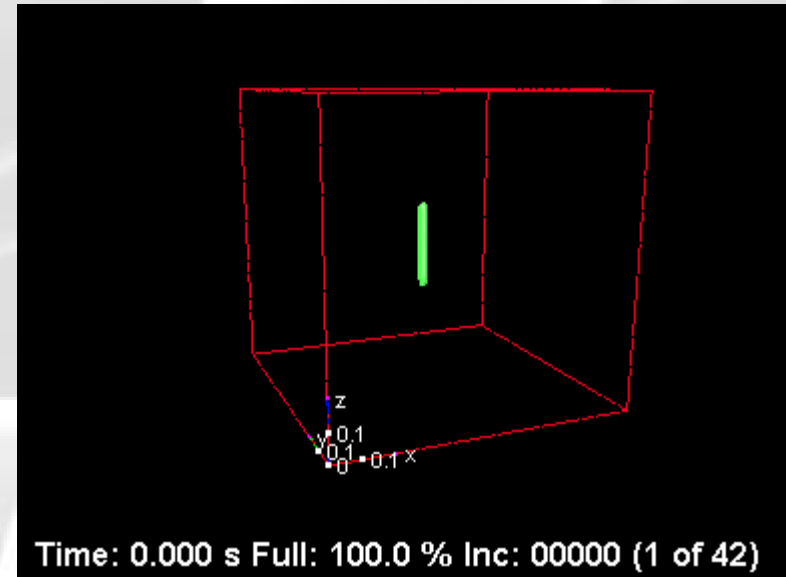
Méthode de Voxelisation



Mouvement d'une particule en cisaillement simple

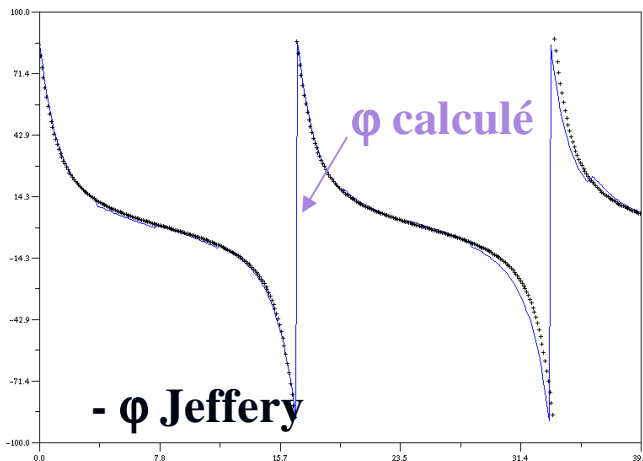


Iso-valeur de la fonction caractéristique 2D



Iso-valeur de la fonction caractéristique 3D

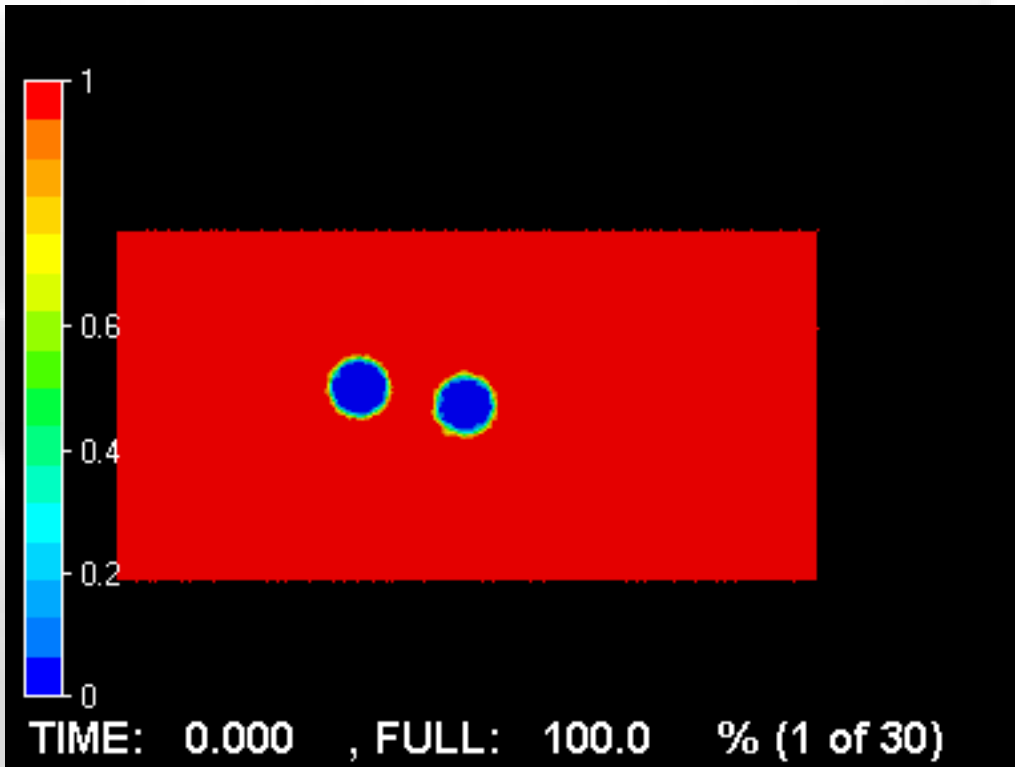
Cisaillement simple, cellule élémentaire
 $\beta=10$



- Condition de périodicité
- Mouvement de rotation périodique
→ *Validation en cisaillement simple avec le modèle de Jeffery*

Interactions Hydrodynamiques

- Prises en compte de toutes les forces agissant sur les particules de manière directes
 - ↳ Calcul couplé : Perturbation du champ de vitesse
 - ↳ Interactions entre particules : Interactions hydrodynamiques

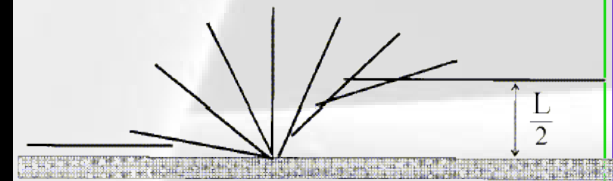
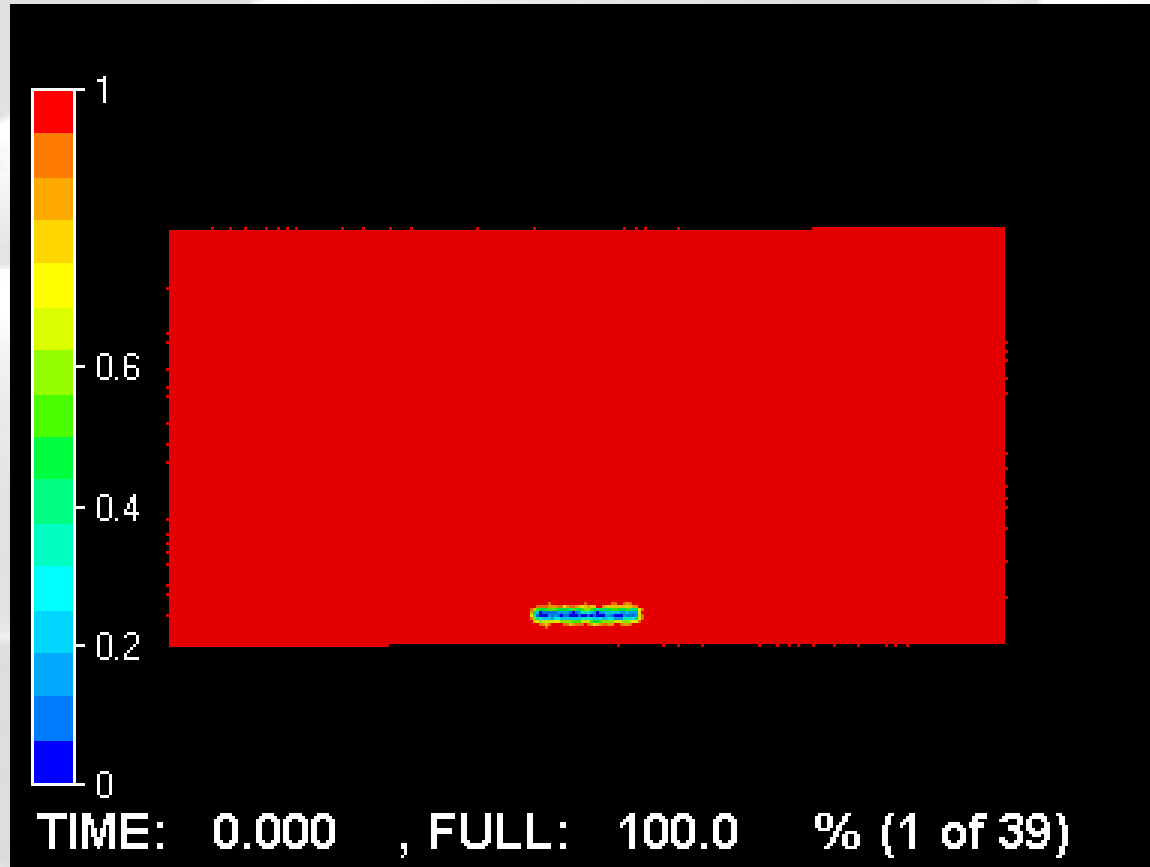


Si on place une sphère seule au centre, la sphère reste immobile,

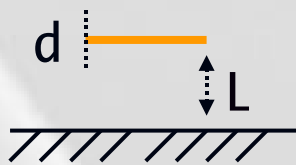
Dans le cas de deux sphères, le mouvement de la sphère initialement au centre est perturbée.

Influence des parois

- Une fibre parallèle à la paroi



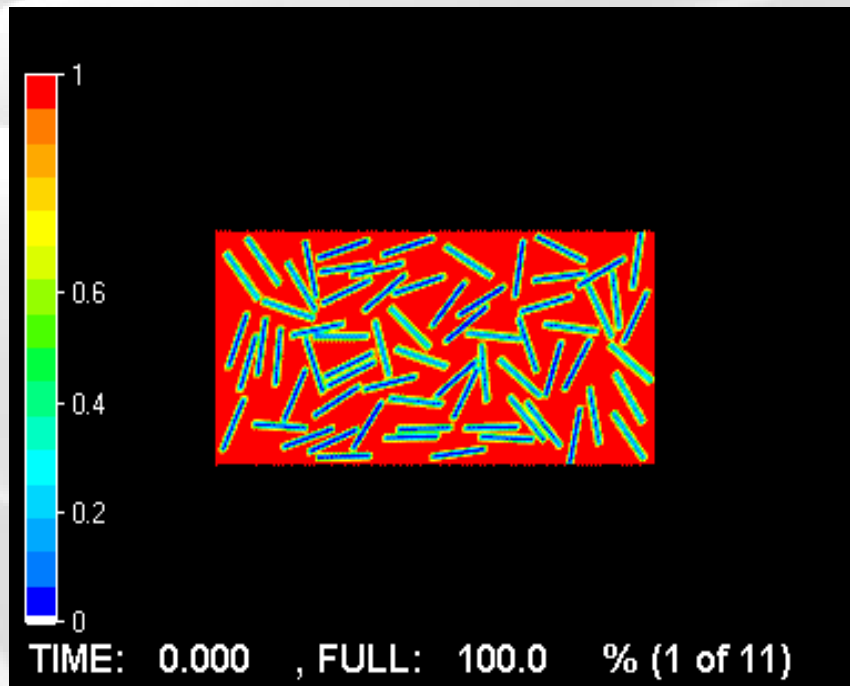
Effet de Migration



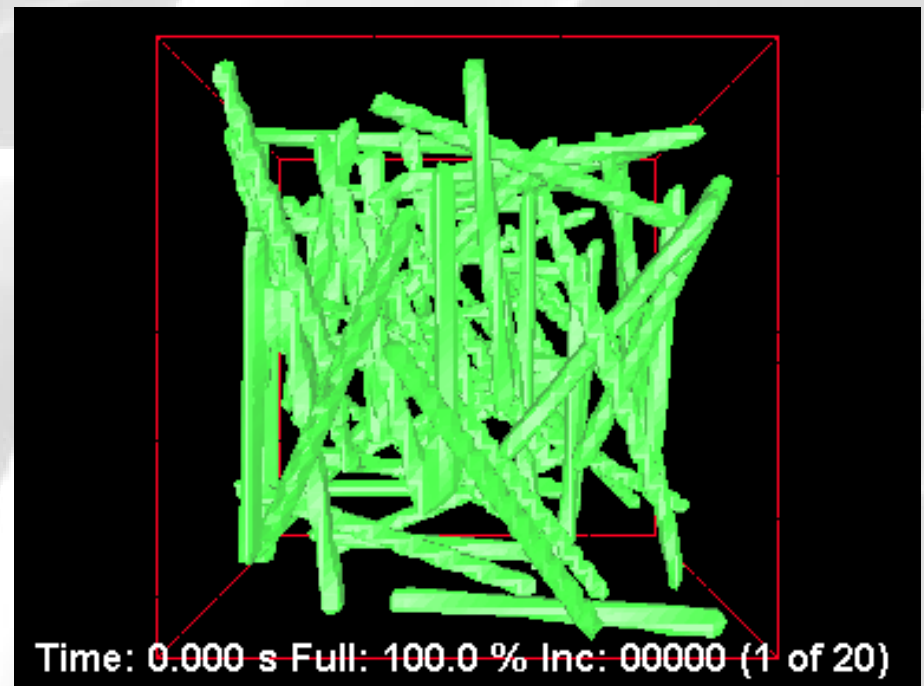
• *Fibre Parallèle* : $T \nearrow$ lorsque $L \searrow$

Mouvement de 60 fibres en cisaillement simple

- 60 fibres avec une orientation initiale aléatoire
- Cisaillement simple



$\beta = 10$ – suspension concentrée -



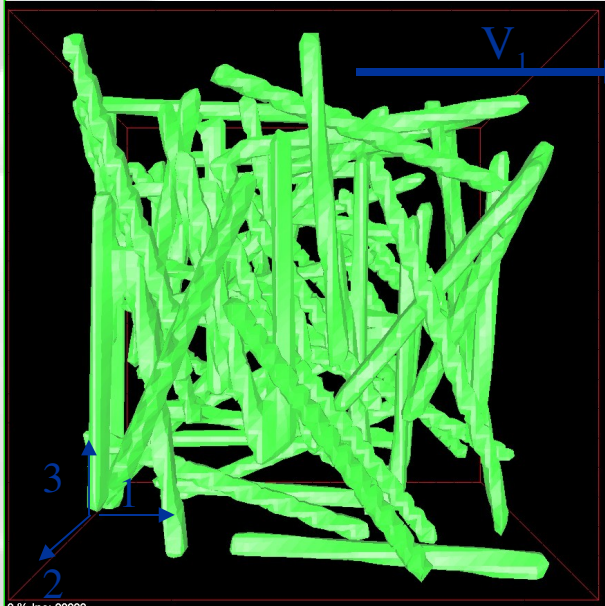
$\beta = 12$ – suspension concentrée -
Maillage : 403 200 elts – 68 921 nœuds

$\Delta t = 0,1$ et $\Delta x = 0,025$

CPU : 15 jours (1 429 692 s)

Mouvement 3D de 60 fibres en cisaillement simple

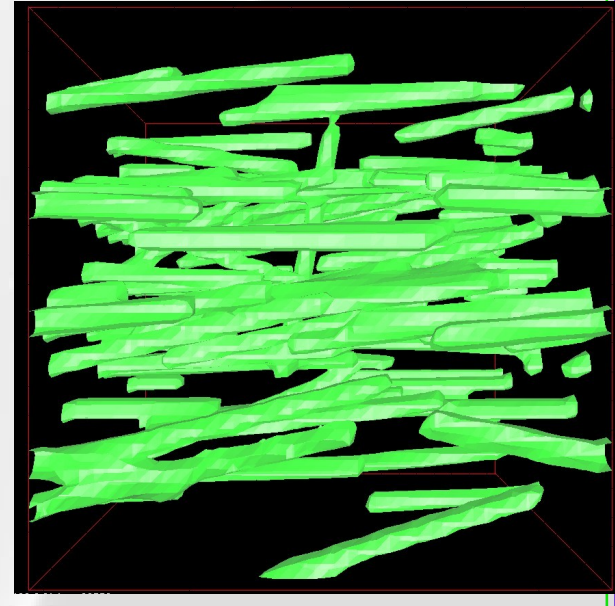
- Suspension concentrée, $\beta = 12$
- Cisaillement simple



Instant initial



Déformation 5



Déformation 10



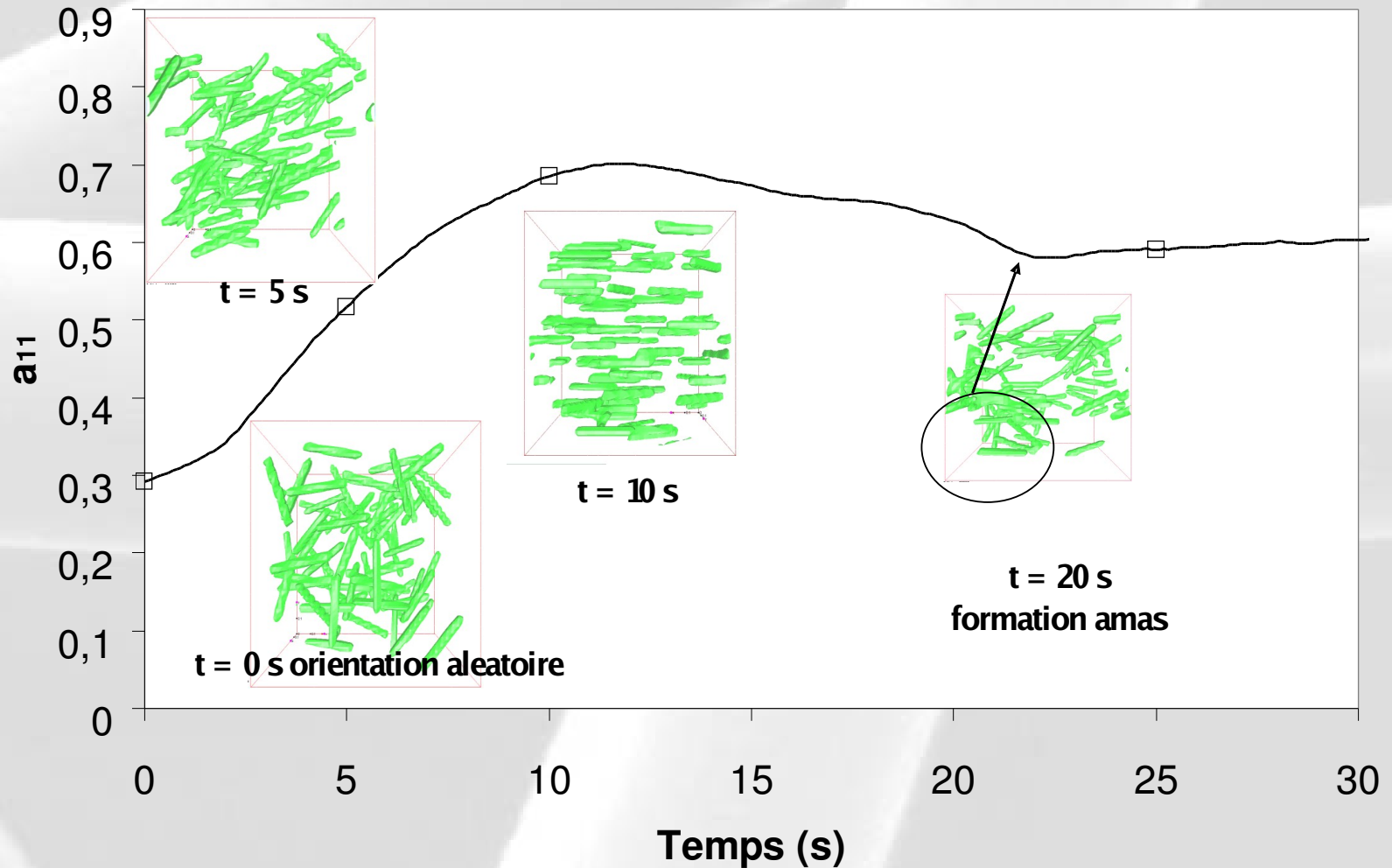
Evolution de a_2 et a_4 avec le temps

$$a_2 = \frac{1}{60} \sum_{k=1}^{60} p_k \otimes p_k$$

$$a_4 = \frac{1}{60} \sum_{k=1}^{60} p_k \otimes p_k \otimes p_k \otimes p_k$$

Exemple d'évolution du tenseur a2

■ Evolution du tenseur a2 avec le temps



— $\beta=6, \Phi = 4\%$ □ Images du calcul

Exploitation de l'outils

➔ Etudier la dynamique d'orientation

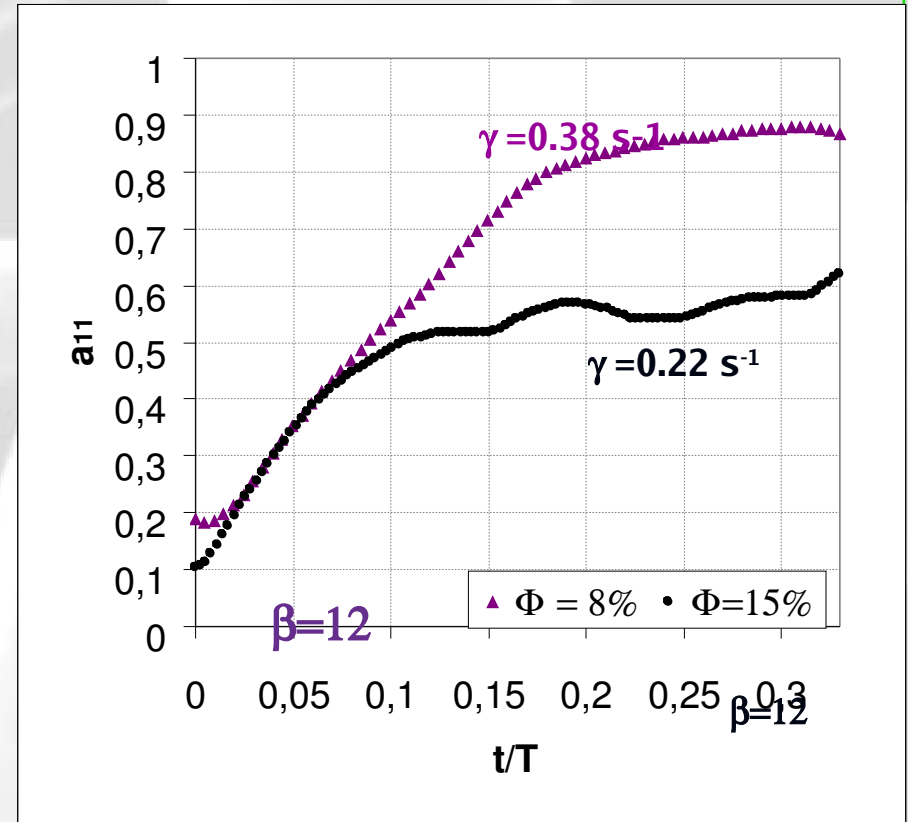
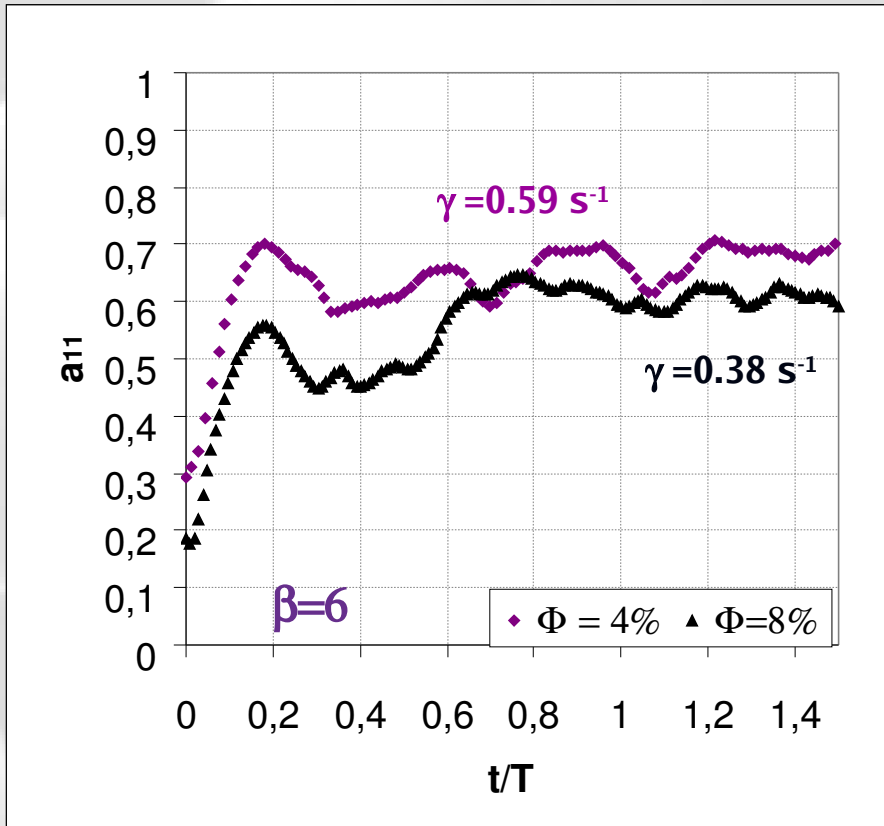
- *Concentration* : ϕ
- *Rapport de forme* : β
- *Paramètres du modèle statistique d'orientation* : C_i et $a_4 = f(a_2)$

➔ Etudier le comportement rhéologique

- *Viscosité* $\eta = f(\phi, \beta)$
- *Paramètre rhéologique* : N_p

Étude de l'interaction

- Influence de la concentration sur l'évolution de la composante a_{11} de a_2

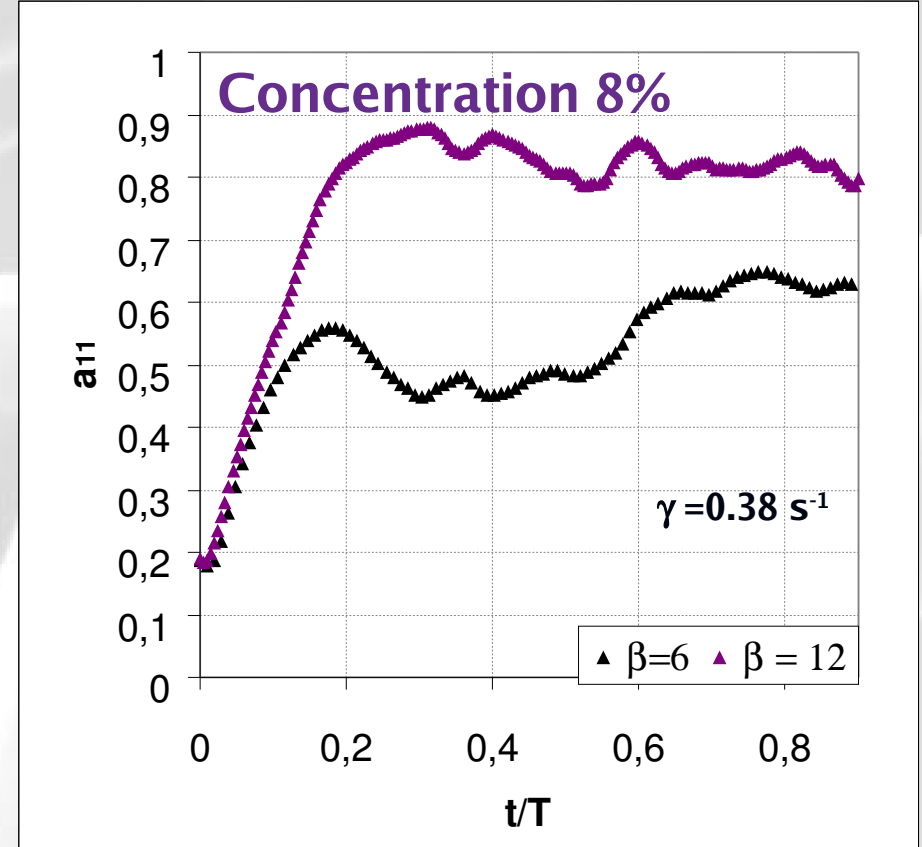
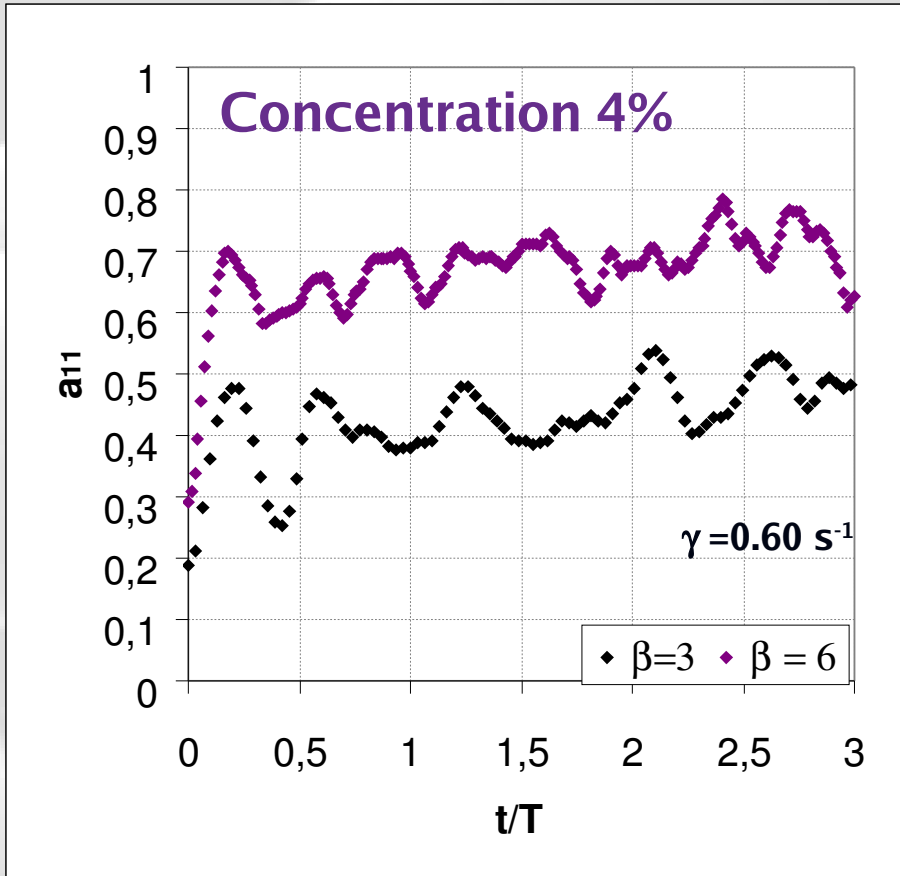


 Plus ϕ est grand, plus $\gamma (\text{s}^{-1})$ est petit et moins les fibres s'orientent dans la direction d'écoulement.

Désalignement des fibres dans la direction d'écoulement

Étude de l'interaction

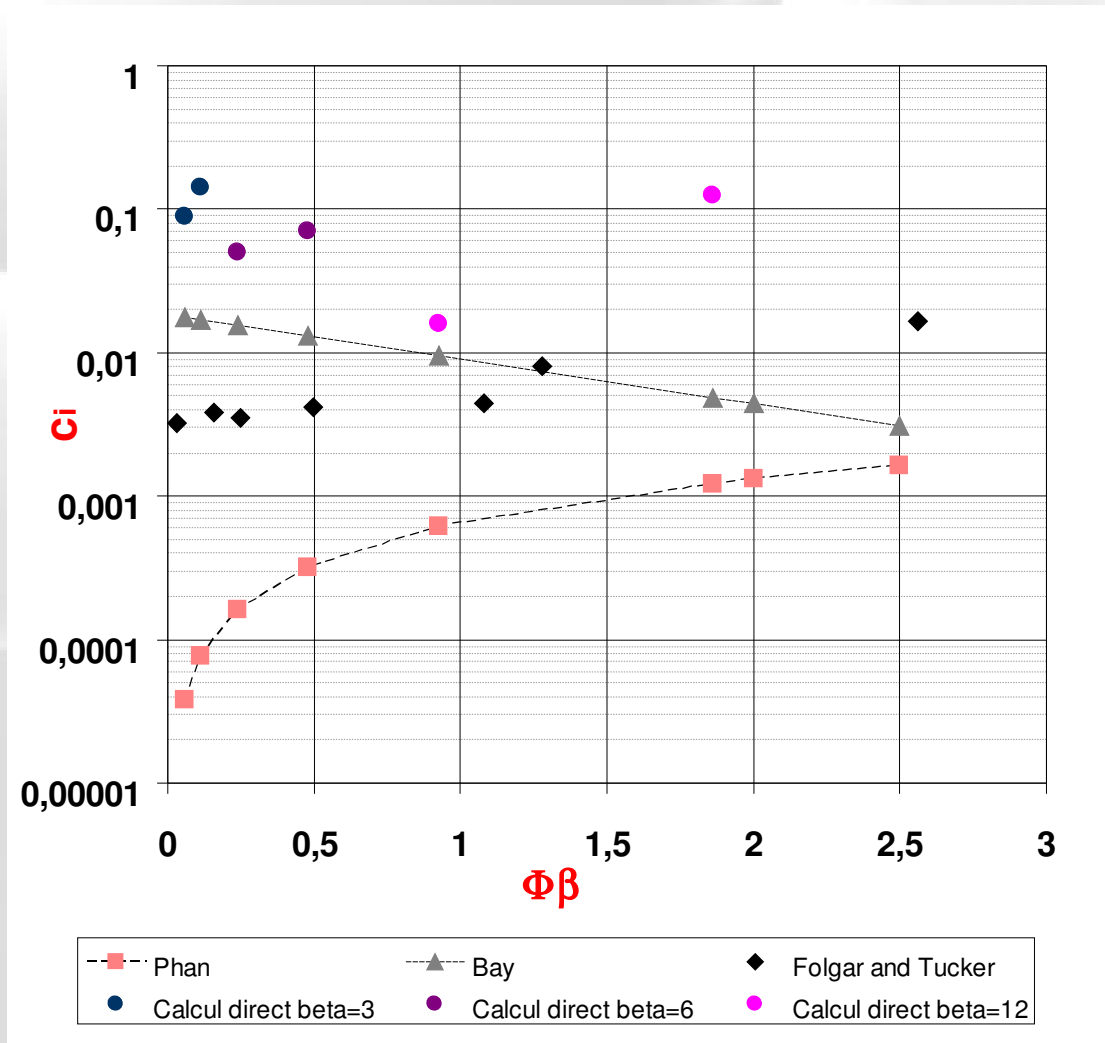
- Influence de la longueur des fibres sur l'évolution de a_{11}



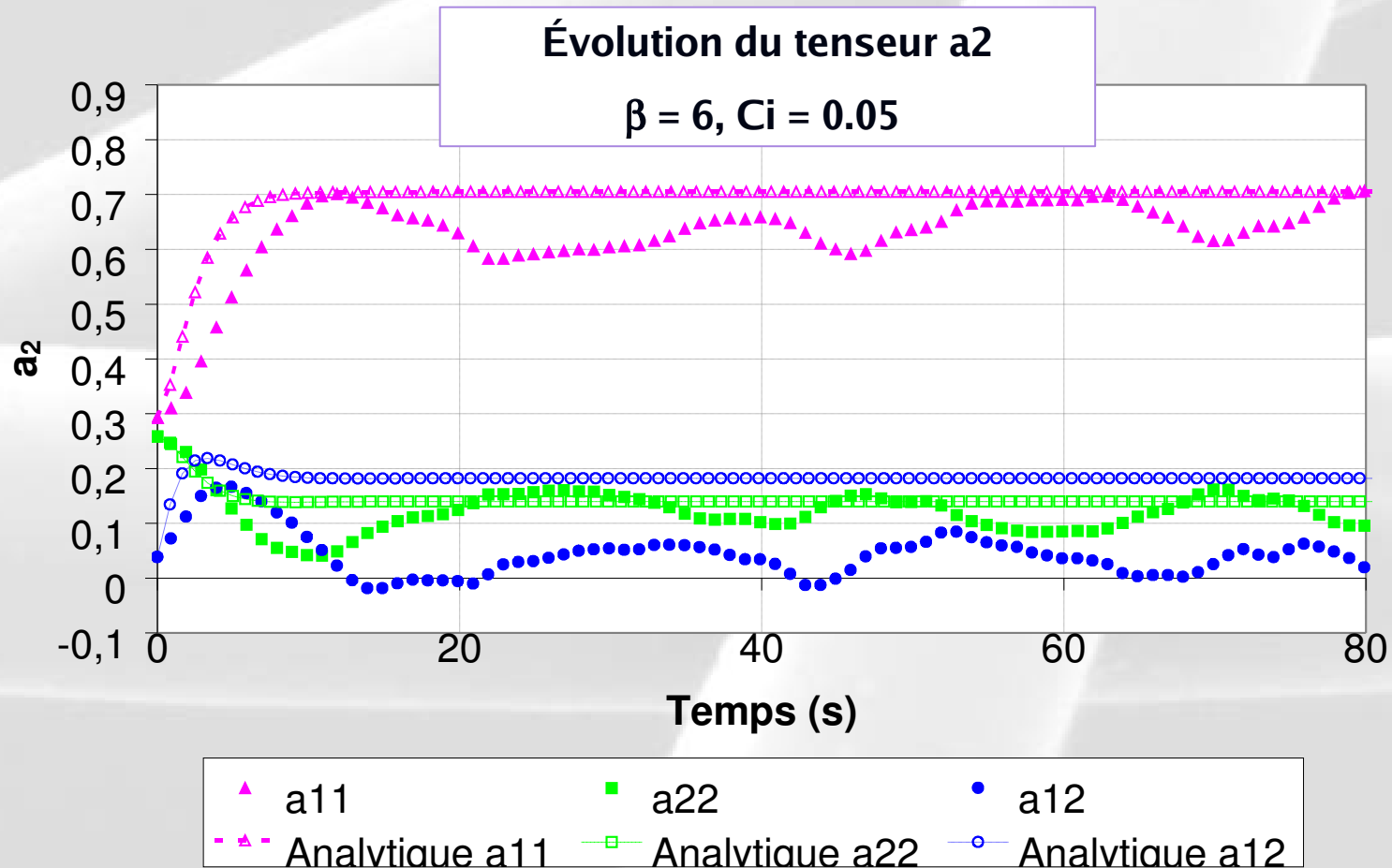
A concentration identique, on observe que les fibres les plus longues s'orientent mieux dans la direction d'écoulement

Évaluation du paramètre C_i par simulation directe

- Méthode de mesure : Sur l'équation de Folgar et Tucker à l'état stationnaire



Validation de la méthode

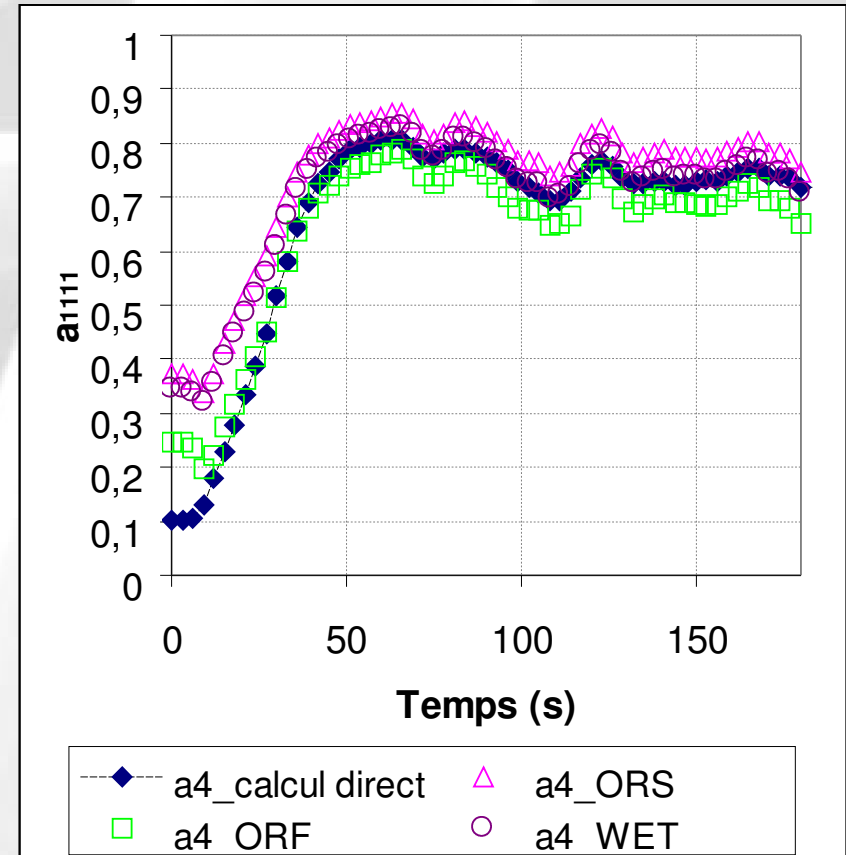
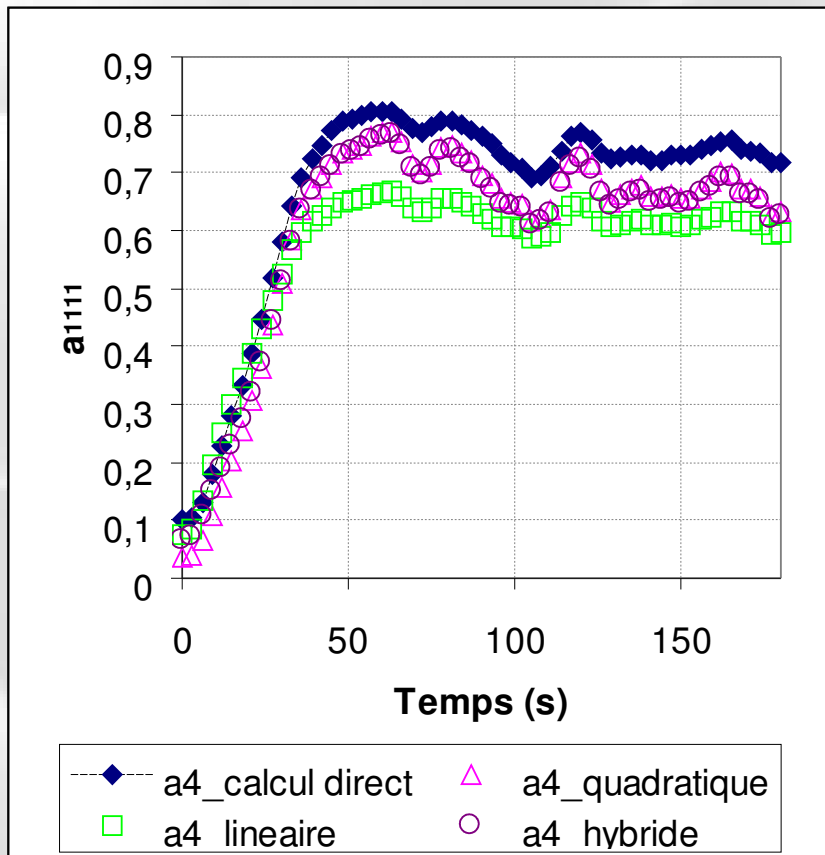


- Le calcul direct de C_i est validé en confrontant les mesures aux solutions analytiques
- Bonne estimation des composantes a_{11} et a_{22}
- Des différences pour la composante a_{12} (*approximation de fermeture quadratique ??*)

Étude des approximations de fermeture

- Simulation directe → Évolution de a_2 et a_4
- Comparer l'évolution de a_2 et de $a_4 = f(a_2)$

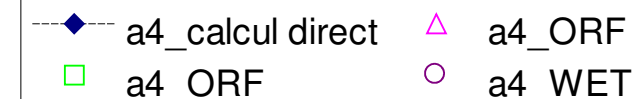
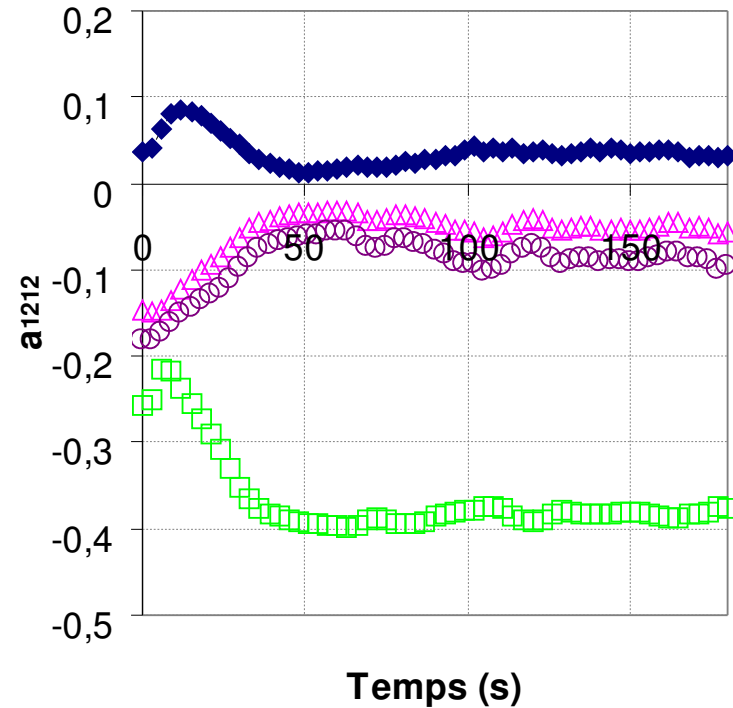
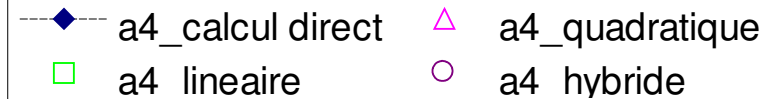
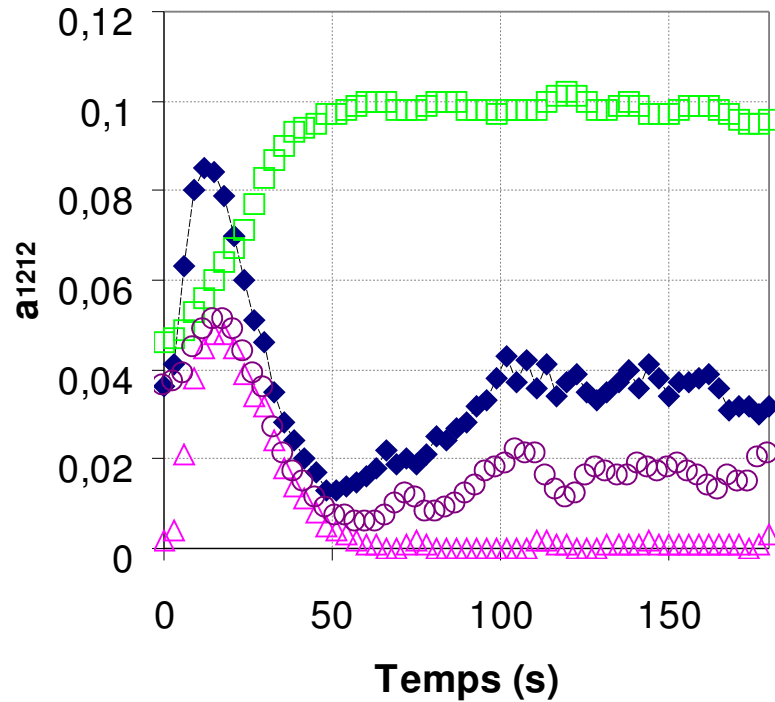
Evolution de la 1^{ère} composante du tenseur a_4



Écoulement de cisaillement simple, $\beta = 12$ et $\phi = 7.7\%$

Les approximations de fermetures

Evolution de composante a_{1212} du tenseur a_4



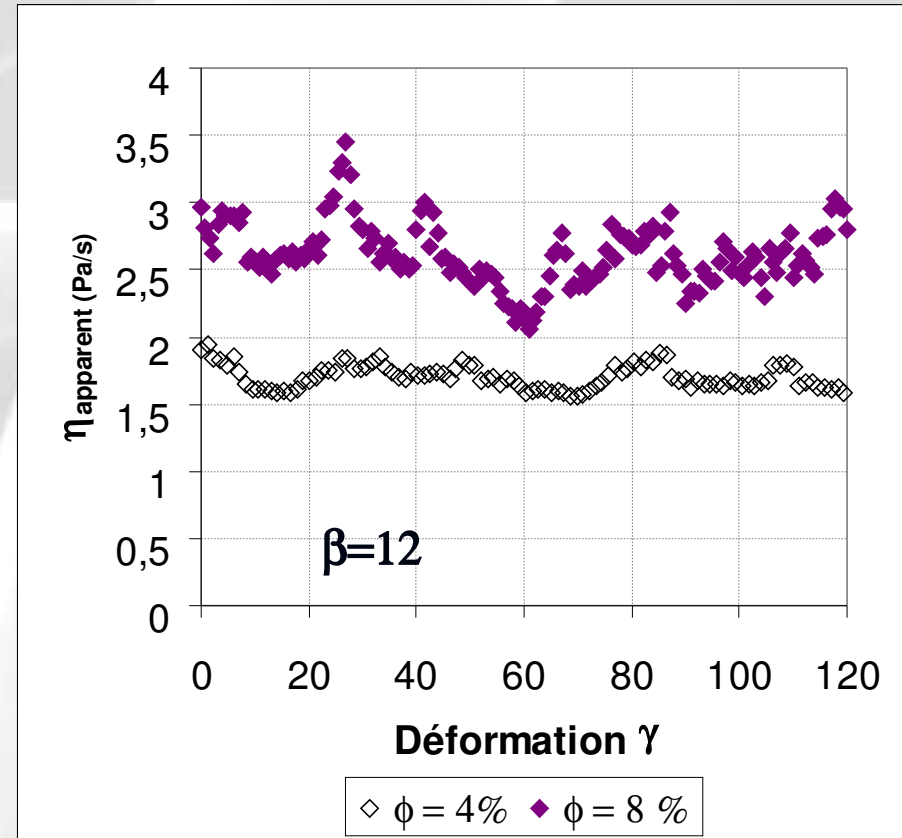
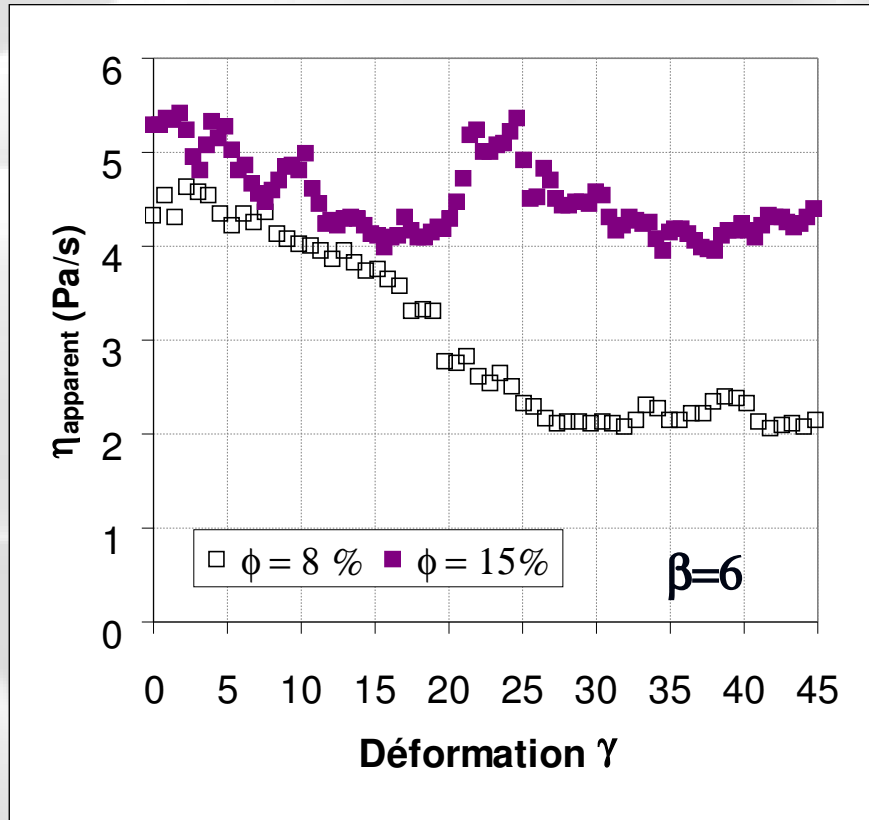
■ Bilan des approximations

- ✓ Hybride : ok
- ✓ Orthotrope : surprenant!

Evolution de la viscosité avec la déformation

- Influence de la concentration des fibres sur la viscosité

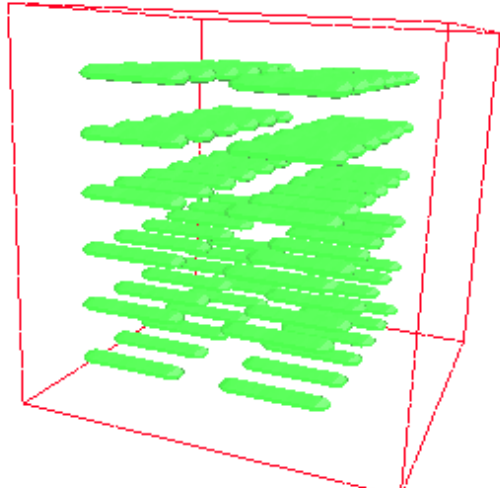
$$\eta_{\text{apparent}} = \frac{\sigma_{\text{imposed}}}{\dot{\gamma}_{\text{apparent VER}}}$$



 *La viscosité est une fonction croissante de la fraction volumique*

Etude de loi de comportement

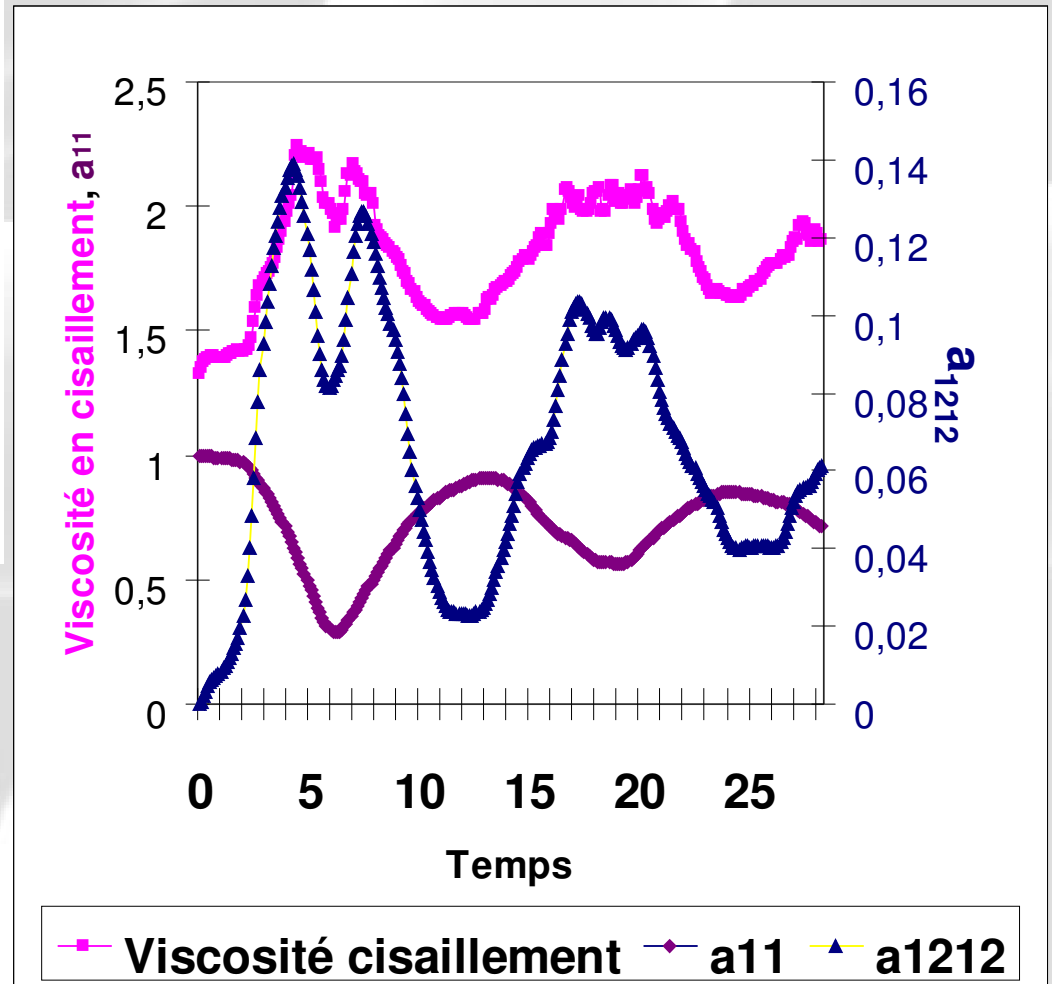
- Théorie des corps élancés : $\eta_{cisail} = \eta_{fluide} (1 + 2N_p a_{1212})$



Time: 0.000 s Full: 100.0 % Inc: 00000 (1 of 29)

*72 fibres initialement orientées
parallèlement à l'écoulement*

- La composante a_{1212} permet de rendre compte de l'évolution de viscosité du l'orientation des fibres



Identification de paramètre rhéologique N_p

- Loi de comportement issue de la théorie de coprs élancés

$$\eta_{cisail} = \eta_{fluide} (1 + 2N_p a_{1212})$$

- Mesure de N_p : *moyenne dans le temps de $\eta_{cisaillement}$ et de a_{1212}*
- Résultats et confrontation avec les expression analytique de N_p

β	ϕ (%)	N_p	N_p Bathelor	N_p Shaqfeh & Fredrickon
3	2	2,19	0,05	0,069
	4	4,79	0,109	0,109
6	4	6,9	0,267	0,522
	8	19,54	0,535	1,3544
12	8	24,40	1,54	4,67
	15	54,71	2,89	12,11



Valeur de N_p croissante avec β et ϕ

Conclusions et Perspectives

Objectifs : Contribution à la compréhension et à la modélisation des phénomènes d'orientation dans des thermoplastiques renforcés

- **Approche expérimentale : *Caractériser l'orientation et la structure des fibres dans une plaque***

- **Approche numérique : *Modélisation de l'orientation des fibres basée sur un calcul de simulation directe***

Conclusions

- **Caractérisation de l'évolution de la structure des fibres lors de l'injection d'une plaque en polypropylène.**
 - ***Une distribution de longueur***
 - ***Amas et fibres courbées***
 - ***Orientation très influencée par le taux de fibres et la longueur***
 - ***Pas d'influence significatives des paramètres procédé sur l'orientation***

- **Modélisation du comportement d'une population de fibres**
 - ***Développement et mise au point d'un modèle directe***
 - *Interactions hydrodynamiques,*
 - *Interactions avec les parois de la cavité*

 - ***Homogénéisation Numérique***
 - ***Modèle d'orientation : estimation du C_i et approximation de fermeture hybride en cisaillement simple***
 - ***Modèle de comportement : $\eta_{apparente}$ et mesure de N_{49}***

Perspectives

■ D'un point expérimental :

➤ **Structure et Orientation :**

- *Informations sur la courbure et notion enchevêtrement dans l'épaisseur*
- *travailler avec des pièces plus complexes (Nervures)*
- *Phénomènes d'expulsion de fibres en front de matière*

➤ **Rhéologie**

- *Mise au point d'un outillage de rhéologie des suspensions de fibres longues*
- *Mesures du paramètre N_p*

■ D'un point de vue numérique :

➤ **Choix du VER – Test de sensibilité**

➤ **Calcul parallèle**

➤ **Algorithme de couplage fluide – Structure**

- *Lagrangien pénalisé, Level Set, Flexibilité des fibres*

➤ **Lutter contre les amas numérique !**

➤ **Pas d'influence significatives des paramètres procédé sur l'orientation**

Perspectives

- **Exploitation de l'outils numérique**
 - ***Faire varier les cinétiques d'écoulement***
 - ***Mesure de C_i et du paramètre N_p***
 - ***Augmenter les concentrations de fibres***
 - ***Prise en compte d'une multi population de fibres***
 - ***Prendre en compte le caractère viscoélastique de la matrice***



le 13 Juillet 2005

Étude et Modélisation de l'orientation de fibres verres dans des thermoplastiques injectés

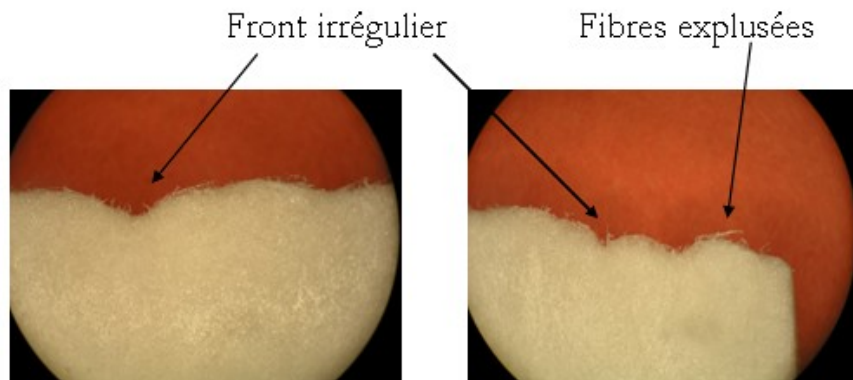
Alexandra MEGALLY

sous la direction de

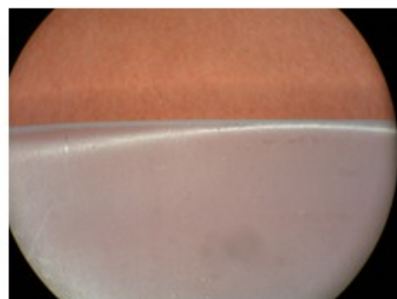
**Michel VINCENT
Patrice LAURE & Thierry COUPEZ**

Observation d'un incomplet

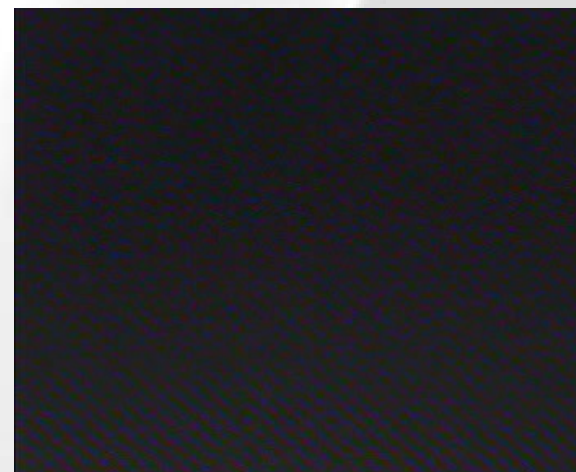
- Observation sur une plaque PP renforcé de fibres longues



Front de matière d'un polypropylène renforcé de fibres de verres longues



Front de matière d'un polypropylène vierge



Questions et remarques des rapporteurs

▪ Rapport de Denis Favier

❖ Modèle de simulation directe

- *L'hypothèse de base du modèle ici présenté est que les fibres sont entièrement entourées de fluide et que toutes les interactions se produisent par l'intermédiaire de fluide entourant les fibres. L'analyse physique sur ce point n'est certainement pas assez poussée pour valider ou montrer les limites de cette hypothèse ; est-il physiquement justifié, et dans quelles conditions, d'exclure les liaisons directes interfibres et fibres-parois?*

- **Remarque :** *Dans la modélisation utilisée par A.Megally, la cinématique de déformation est imposée au fluide, en appliquant aux frontières d'un VER des conditions en vitesse sur le fluide seul. Dans l'opinion du rapporteur, lorsque le VER est situé au sein même de la matière (par exemple dans la zone cœur de l'écoulement, souvent en écoulement élongationnel), des efforts passent entre les VER par l'intermédiaire des fibres, ce qui n'est pas pris en compte dans le modèle actuel.*

❖ *Validation Numérique : Influence des aspects numériques (pas de temps et pas d'espace, position de la fibre)*

Questions et remarques des rapporteurs

▪ Rapport de Denis Favier

❖ Transport des fibres :

- Une technique utilisant le caractère rigide des fibres est ensuite utilisée ; le transport est simplement obtenu grâce au déplacement du centre de masse et de ses extrémités (ne suffit-il pas du centre et d'une seule extrémité ou d'un seul point ?).
- Raffinement de maillage nécessaire pour appliquer cette technique

❖ Application du modèle à l'étude d'une population de fibres

- Discussion trop faible sur les techniques d'homogénéisation, conditions de contact collant est discutable ?
- erreurs de mesures de 13% = $1/\sqrt{\text{nombre de fibres}}$
- Estimation des erreurs de calculs avec deux VER
- Mesure de N_p discutable dans le cas d'un écoulement de cisaillement simple
- Choix de $\eta_1 = \eta$ du fluide ?

Questions et remarques des rapporteurs

▪ Rapport de Paco Chinesta

❖ Transport des fibres :

- *Détails concernat l'actualisation des domaines fibres pas assez explicités.*

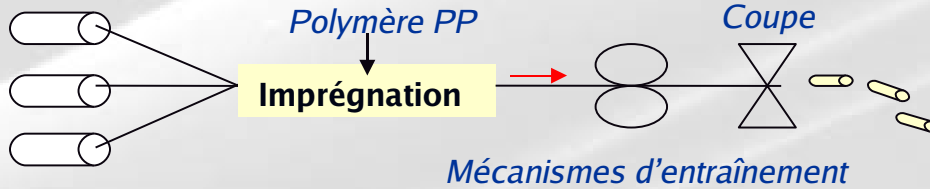
❖ Application du modèle à l'étude d'une population de fibres

- *Remarque sur la méthode de calcul du C_i et les tests des différentes approximation de fermeture*

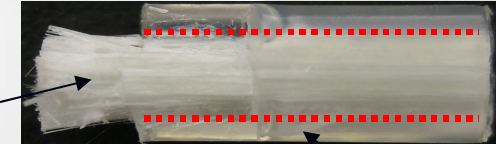
Problématique

▪ Fabrication des granulés par le procédé de pultrusion

Bobines de fibres



Mèches de fibres

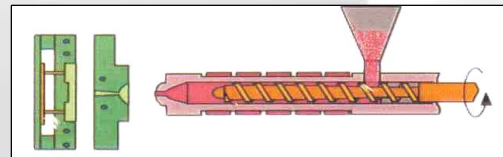


Polymères



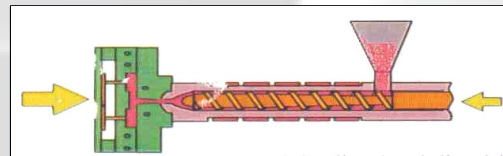
▪ Moulage par injection

1. Plastification



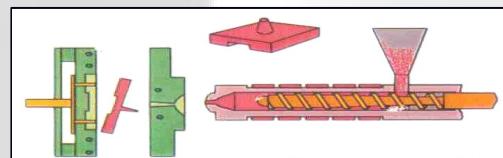
Casse des fibres

2. Remplissage et compactage



Écoulement oriente les fibres
Les fibres modifient le profil de vitesse

3. Refroidissement et éjection



Propriétés mécaniques → Orientation
et caractéristiques des fibres

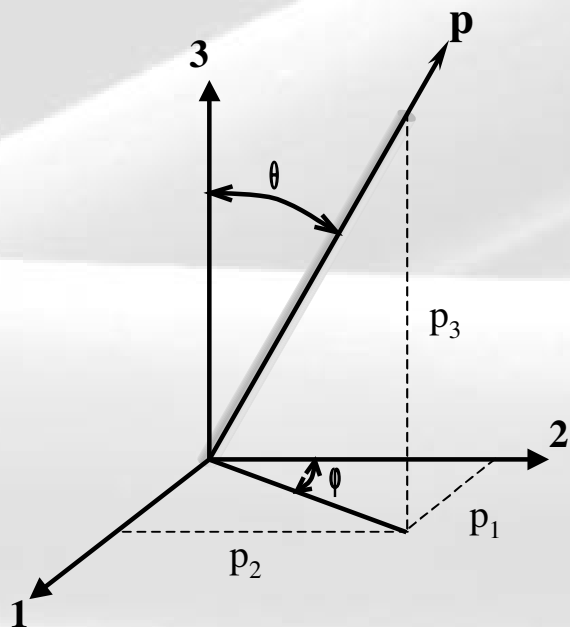
Orientation de fibres est un problème complexe

→ Prédiction des propriétés mécaniques

Modélisation de l'orientation

- Mouvement d'une particule en écoulement [Jeffery 1922]

- Écoulement Newtonien
- Particule rigide
- Particule petite devant les dimensions de l'écoulement



➡ Équation d'évolution en \underline{p} :

$$\dot{\underline{p}} = \frac{d\underline{p}}{dt} = \underline{\Omega} \underline{p} + \lambda \left(\underline{\dot{\varepsilon}} \underline{p} - \left(\underline{\varepsilon} : \left[\underline{p} \otimes \underline{p} \right] \right) \underline{p} \right)$$

↓
Tenseur de rotation

↓
Tenseur des vitesses de déformation

$$\lambda = \frac{\beta^2 - 1}{\beta^2 + 1} \quad \beta = \frac{L}{D}$$

Modélisation de l'orientation d'une population de fibres

■ Fonction de distribution de l'orientation : $\Psi(p, t)$

■ Description plus concise de l'orientation [Advani et al. 1987]

$$a_{ij} = \int_p \Psi(p) p_i p_j dp \qquad a_{ijkl} = \int_p \Psi(p) p_i p_j p_k p_l dp$$

■ Modèle phénoménologique de Folgar et Tucker (1984)

Modèle de Jeffery

Tenseur des vitesses de déformation

Coefficient de diffusion

$$\frac{Da_2}{Dt} = \Omega a_2 - a_2 \Omega + \lambda (\varepsilon a_2 + a_2 \varepsilon - 2\varepsilon : a_4)$$

$$+ 2C_i \bar{\varepsilon} (I_d - 3a_2)$$

Tenseur d'orientation

Tenseur de rotation

Intervention d'une équation de fermeture (1)

Terme d'interaction entre les fibres (2)

$$\left. \begin{aligned} a_2 &= f(a_4) \\ a_4 &= f(a_6) \\ a_{2n} &= f(a_{2n+2}) \end{aligned} \right\}$$

Approximation de Fermeture

$$a_4 = F(a_2) ?$$

Valeur de C_i ?

Bilan des modèles de comportement

Les difficultés liées à la modélisation de produit chargé de fibres

■ Modélisation de l'orientation d'une suspension de fibres concentrée

➤ Modèle de Folgar et Tucker

- ❖ *Introduction d'une approximation de fermeture*
- ❖ *Déterminer le coefficient d'interaction C_i soit par mesure expérimentale ou par calcul numérique*

■ Modélisation du comportement rhéologique

➤ Modèle de la théorie élargée

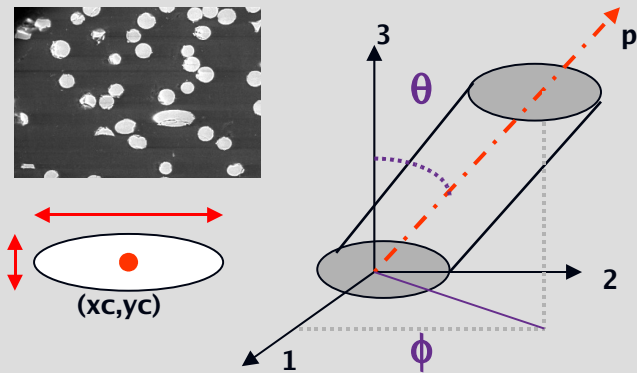
- ❖ *Identifier les paramètres N_p par des mesures expérimentales*
- ❖ *Choix d'une approximation de fermeture*

1.3 Technique de mesure de l'orientation

Technique de mesure surfacique sur des coupes micro polies

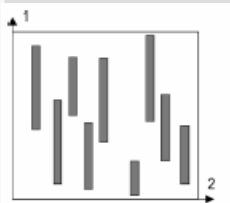
Analyse d'image : Technique des moments d'inertie

→ Dimension de l'ellipse = orientation 1 fibre

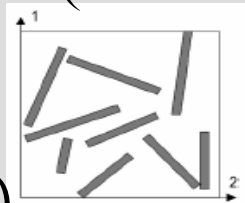


Outils statistique : Tenseur d'orientation a_2

$$a_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n a_{ij}^k = \frac{1}{n} \left(\sum_{k=1}^n p_i^k \cdot p_j^k \right)$$

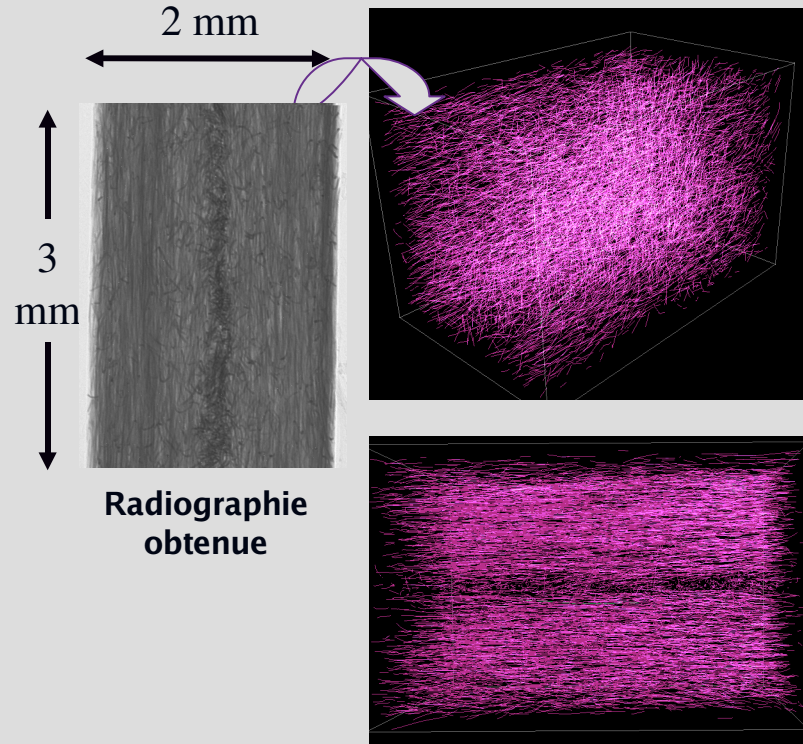


$$a_2 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$



$$a_2 = \begin{pmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{pmatrix}$$

Technique 3D de micro tomographie par rayon X



- Technique récente limitée par la taille d'échantillon
- Orientation globale dans le volume
- Information sur la courbure des fibres

Modélisation de l'orientation d'une population de fibres

- Modèle phénoménologique de Folgar et Tucker (1984)

$$a_{ij} = \int_p \psi(p) p_i p_j dp$$

$$a_{ijkl} = \int_p \psi(p) p_i p_j p_k p_l dp$$

Modèle de Jeffery

$$\frac{Da_2}{Dt} = \Omega a_2 - a_2 \Omega + \lambda (\varepsilon a_2 + a_2 \varepsilon - 2 \varepsilon : a_4)$$

$$+ 2C_I \dot{\varepsilon} (I_d - 3a_2)$$

Tenseur des vitesses de déformation

Coefficient de diffusion

Tenseur d'orientation

Tenseur de rotation

Intervention d'une équation de fermeture (1)

Terme d'interaction entre les fibres (2)

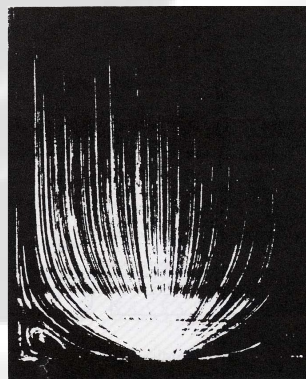
$$\lambda = \frac{\beta^2 - 1}{\beta^2 + 1} \quad \beta = \frac{L}{D}$$

Comportement rhéologique d'une suspension de fibres

■ Constat expérimental

- relation rhéologie ↔ orientation
- Les fibres modifient l'écoulement

Lignes de courant dans une contraction



Matrice non chargée
Lipscomb, 1988



Matrice chargée à 0.045%
en volume

■ Loi de comportement

$$\underline{\underline{\sigma}} = \underbrace{-p \underline{\underline{I}}_d + 2\eta \underline{\underline{\epsilon}}(v)}_{\text{Contribution du fluide}} + \underbrace{2\eta N_p (\underline{\underline{\epsilon}}(v) : \underline{\underline{a}}_4)}_{\text{Contribution des fibres}}$$

Viscosité du fluide
 Quantifie la résistance de la suspension lors d'une sollicitation élongationnelle
 Équation de fermeture

$N_p = f(\beta, \phi)$
 Détermination de N_p ?