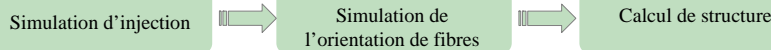


Abla Redjeb, Patrice Laure\*, Thierry Coupez, Michel Vincent

Ecole des Mines de Paris – CEMEF – UMR CNRS 7635, BP 207 - 06904 Sophia Antipolis Cedex – France  
 \*INLN, UMR 6618-UNSA – 06560 Valbonne - France

- Enjeux scientifiques :**
- ❖ Intégrer dans la plateforme [Rem3d](#) un module « Orientation » permettant la prédiction des écoulements chargés de fibres.
  - ❖ Comprendre les phénomènes d'orientation de fibres au cours du procédé de remplissage.

**Contexte industriel :** ❖ Générer une chaîne de calcul automatique



- ❖ Prédiction et anticipation du comportement thermomécanique des pièces moulées (orientation des fibres, dispersion, contraintes résiduelles, déformée des pièces, ...).
- ❖ Optimisation du process.

## Un peu de modélisation ...

### ❖ Les phénomènes d'orientation en injection

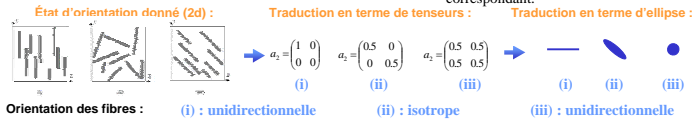


### ❖ Une population de fibres = un tenseur a2

$\underline{a}_2 = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}$  modélisé par Une ellipse → directions principales de l'ellipse = vecteurs propres du tenseur affectés de la valeur propre correspondante

Probabilité d'avoir une orientation de la fibre dans la direction du vecteur propre correspondant.

### ❖ Exemple :



### ❖ Le problème régi par l'orientation des fibres : un problème numérique complexe ...

➢ Le tenseur d'orientation  $\underline{a}_2$  est régi par une équation d'évolution tensorielle ➔ équation de transport

Paramètres clés lors de la résolution numérique :

- ✓ Rapport de forme de la fibre :  $\beta = \frac{L}{D}$  → Longueur de la fibre / Diamètre de la fibre
- ✓ Coefficient de diffusion :  $D_r = 2C_p \dot{\underline{\epsilon}}$  → Coefficient d'interaction, nombre intrinsèque au matériau
- ✓ Equation de fermeture : Permettant de fermer l'équation d'évolution de l'orientation.

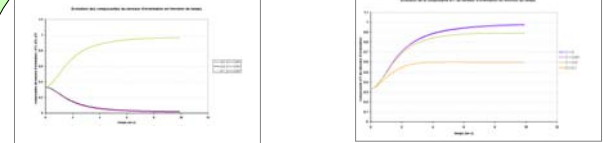
Résolution numérique via [Rem3d](#)

équation de transport ➔ Méthode éléments finis de type Galerkin discontinue

Orientation des fibres sans couplage

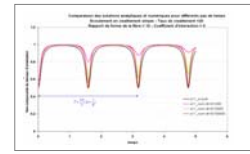
## Résultats numériques concernant l'orientation de fibres

### ❖ En écoulement de cisaillement :

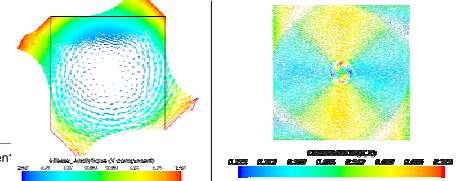


➢ L'orientation des fibres s'effectue principalement suivant la direction de l'écoulement.

➢ Plus le coefficient d'interaction CI est grand, plus la distribution de l'orientation des fibres tend vers l'isotropie.

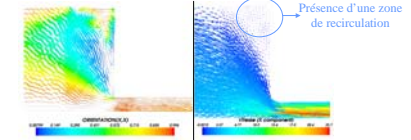


➢ Lorsque CI=0 une fibre a un mouvement de rotation périodique.



➢ Dans une géométrie de type 2d, en présence de zone de recirculation, l'orientation des fibres suit toujours les lignes de courant.

### ❖ En écoulement complexe : contraction



➢ Orientation des fibres lors d'un écoulement de cisaillement simple 3d.

## Le Couplage rhéologie orientation

### ❖ Loi de comportement rhéologique :

$$\underline{\sigma} = -p \underline{I}_d + 2\eta_1 \underline{\dot{\underline{\epsilon}}} + N_s (\underline{\dot{\underline{\epsilon}}} \underline{\dot{\underline{\epsilon}}} + \underline{\dot{\underline{\epsilon}}} \underline{\dot{\underline{\epsilon}}}) + N_p \underline{\dot{\underline{\epsilon}}} : \underline{\dot{\underline{\epsilon}}} : \underline{\dot{\underline{\epsilon}}}$$

Contributions associées à la viscosité dues à la matrice et aux fibres

Paramètre clé de la relation de comportement

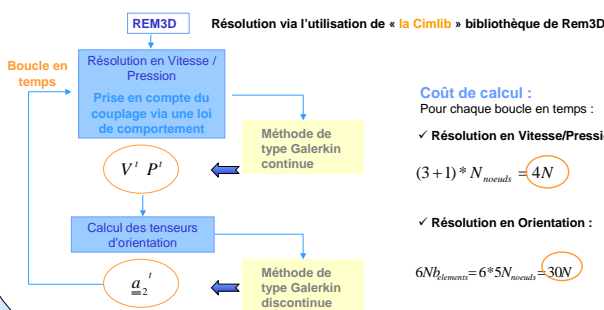
Intervention d'une équation de fermeture !!!

$\eta_1 = f(\phi, \eta)$  Fraction volumique de fibre  
 $N_s = f'(\phi, \beta)$  Rapport de forme de la fibre  
 $N_p = f''(\phi, \beta)$

Paramètres clés lors de la résolution numérique :

- ✓ Paramètres rhéologiques :  $N_p$  et  $N_s$  ✓ Viscosité de la matrice polymérique
- ✓ Fraction volumique de fibres :  $\phi$  ✓ Orientation des fibres à l'état initial

### ❖ Organigramme du programme de calcul :



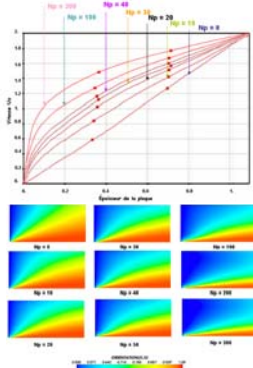
Couplage cinématique – orientation des fibres

## Résultats numériques concernant le Couplage rhéologie orientation

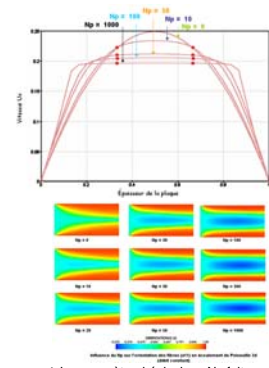
### ❖ Influence du paramètre rhéologique $N_p$ sur la vitesse et l'orientation de fibres

Écoulement entre plaques parallèles : cisaillement simple

#### Cisaillement simple de type « Couette » (i)



#### Cisaillement simple de type « Poiseuille » (ii)



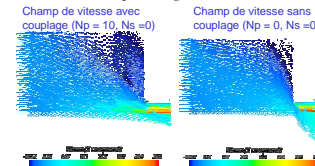
champ de vitesse initial (i)

champ de vitesse initial (ii)

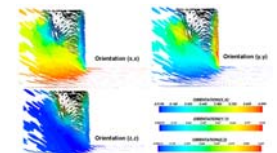
➢ La présence des fibres augmente la pseudoplasticité de la matrice polymérique (écoulement bouchon).

➢ Le paramètre rhéologique  $N_p$  fait apparaître une zone centrale où les fibres s'orientent dans la direction perpendiculaire ➔ structure cœur-peau

#### Écoulement complexe : augmentation de la taille des recirculations



➢ Le couplage cinématique-orientation permet de rendre compte de l'augmentation de la taille des recirculations en présence de fibres.



➢ Orientation des fibres dans une contraction 3d ( $N_p = 10$ )