

Simulation Numérique de l'orientation de fibres en injection de thermoplastique renforcé

Abla Redjeb

Sous la direction de :

Patrice Laure, Michel Vincent, Thierry Coupez



Cécile Venet



Philippe Le Bot



Jocelyn Mauffrey

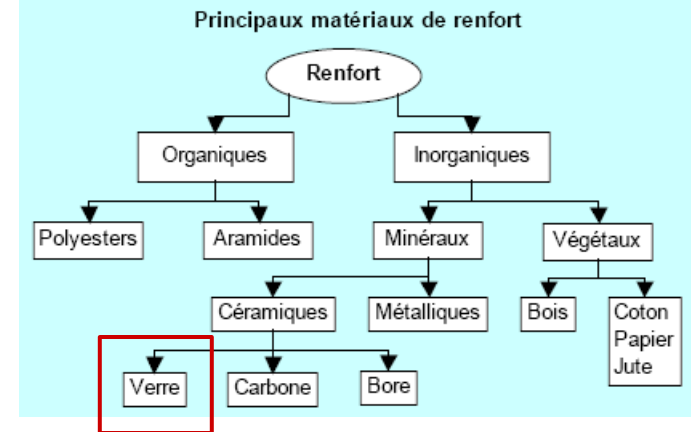
❑ Qu'est ce qu'un composite ?

Matrice organique

- Matrice thermodurcissable
- Matrice thermoplastique
 - Polypropylènes **PP**
 - Polyamides **PA**
 - Poly-éthylène téréphtalate **PET, PBT**
 - Autres : **PAI, PEI, POM, ...**



Renfort



❑ Intérêt des composites ?

- ❑ **Allègement** par rapport aux matériaux traditionnels (acier, aluminium)
- ❑ **Caractéristiques mécaniques** : résistance mécanique et chimique, fluage faible
- ❑ **Coût** : coût de fabrication 3 à 38 €/kg vs 1.5 à 5 €/kg (matériaux traditionnels)
Gain à l'usage (économie pièces de liaison et usinage, frais de maintenance, durée de vie et sécurité)

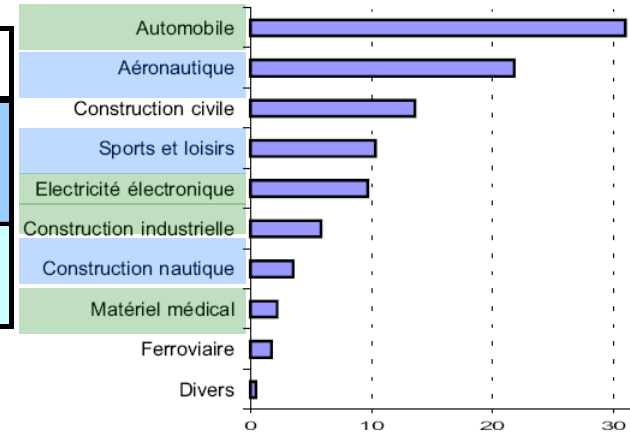
❑ Inconvénients

- ❑ Difficulté de recyclage, difficultés pour la caractérisation des matériaux

❑ Deux familles des matériaux composites :

famille de matériaux	mise en œuvre	Propriétés
haute performance	manuelle et peu automatisée	secteur à forte valeur ajoutée
grande diffusion	estampage, compression, injection	large part de marché

Les secteurs utilisateurs
(en valeur, en %)



❑ Deux classes de granulés de fibres :

- ❑ granulés à fibres courtes (compoundage et granulation)
quelques mm pour 15 µm de diamètre
- ❑ granulés à fibres longues (imprégnation en continu des fibres)
granulés de 10 mm de long

Taux de renfort : 20 à 50 % en poids

Compound constitué de FV enrobé de TP



Objectif de l'étude et démarche

En injection : les fibres s'orientent



Comportement mécanique dépend de l'orientation des fibres

❑ Objectif de l'étude

- ❑ Prévoir ou contrôler l'orientation finale des fibres afin de mieux prédire le comportement des matériaux chargés de fibres en injection
- ❑ Optimisation du process → améliorer les performances mécaniques

❑ Intégrer dans la plateforme [Rem3d](#) un module « orientation »



Logiciel à vocation industrielle



Outil Robuste



Efficacité en terme de coût de calcul

❑ Démarche de l'étude

- ❑ Calculer l'orientation des fibres
- ❑ Prendre en compte le couplage rhéologie/orientation
- ❑ Comprendre les phénomènes d'orientation
- ❑ Corrélation code de calcul Rem3D / Mesures d'orientation

Plan de la présentation

Modèles retenus

❑ Modèles d'orientation issus de la bibliographie

- ❑ Mécanismes et modèles d'orientation macroscopiques de l'orientation de fibres
- ❑ Couplage rhéologie/orientation via une loi de comportement adaptée

Méthodes numériques

❑ Méthodes numériques

- ❑ Méthode éléments finis mixtes appliquée au problème mécanique
- ❑ Méthode de Taylor Galerkin Discontinue Espace-Temps pour l'orientation
- ❑ Algorithme de résolution

Résultats orientation

❑ Orientation des fibres dans des géométries simples

- ❑ Poiseuille 2D, injection moule 3D
- ❑ Contraction plane, Contraction expansion

Application industrielle

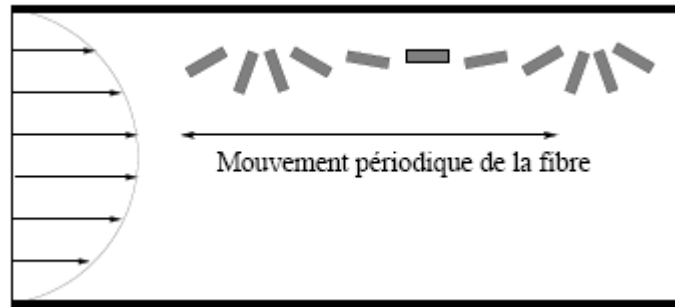
❑ Validation et application industrielle

- ❑ La plaque seuil
- ❑ La traverse nervurée

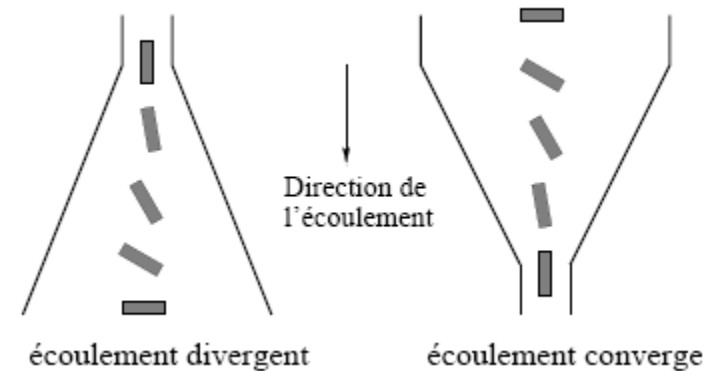
Les mécanismes d'orientation en écoulement

□ Mécanismes d'orientation

↳ En injection deux types de sollicitations vont orienter les fibres

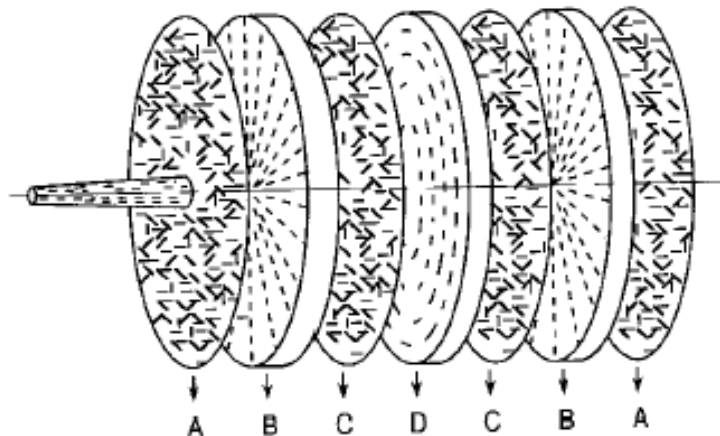


Écoulement de cisaillement simple



Écoulement élongationnel

□ Orientation dans un disque injecté par le centre



A : Orientation isotrope

B : Zones de peau : alignement des fibres (direction d'écoulement)

↳ Écoulement de cisaillement

C : Zones de transition

D : Zone de coeur : fibres orientées perpendiculairement à l'écoulement

Orientations des fibres suivants 7 couches distinctes

[Woebcken, 1971]

↳ Écoulement élongationnel

➤ Modèles retenus

• Mécanismes

• Modélisation

• Régimes concentration

• équation d'orientation

• Loi de comportement

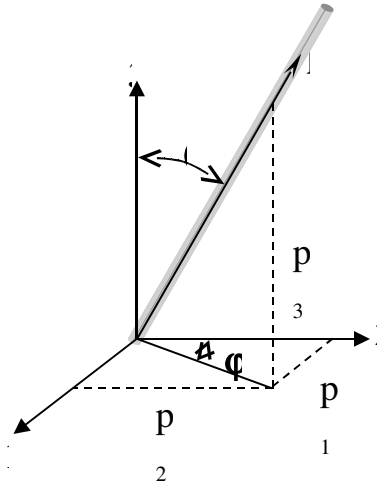
➤ Méthode numérique

➤ Résultats orientation

➤ Résultats industriels

Modélisation de l'orientation des fibres

□ Calcul de l'orientation d'une population de fibres



Fonction de distribution $\psi(p, t)$

Équation d'évolution de Fokker Planck

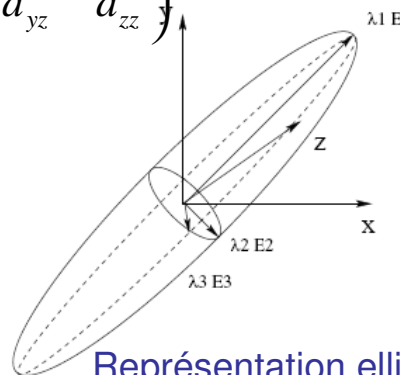


Tenseurs d'orientation [Advani et al. 1987]

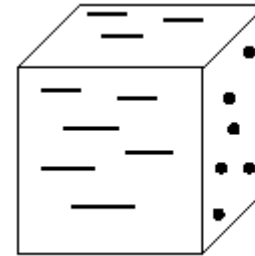
$$a_{ij} = \int_p \psi(p) p_i p_j dp \quad a_{ijkl} = \int_p \psi(p) p_i p_j p_k p_l dp$$

□ Interprétation physique du tenseur d'orientation

$$a_2 = \begin{pmatrix} a_{xx} & a_{xy} & a_{xz} \\ a_{xy} & a_{yy} & a_{yz} \\ a_{xz} & a_{yz} & a_{zz} \end{pmatrix}$$

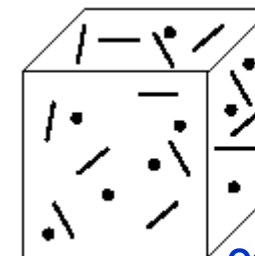


Représentation ellipsoïdale du tenseur d'orientation



Orientation unidirectionnelle

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$



Orientation isotrope

$$A = \begin{bmatrix} 1/3 & 0 & 0 \\ 0 & 1/3 & 0 \\ 0 & 0 & 1/3 \end{bmatrix}$$

- Modèles retenus
 - Mécanismes
 - **Modélisation**
 - Régimes concentration
 - équation d'orientation
 - Loi de comportement

➤ Méthode numérique

➤ Résultats orientation

➤ Résultats industriels

Modélisation de l'orientation des fibres

Modèles retenus

• Mécanismes

• Modélisation

• Régimes concentration

• équation d'orientation

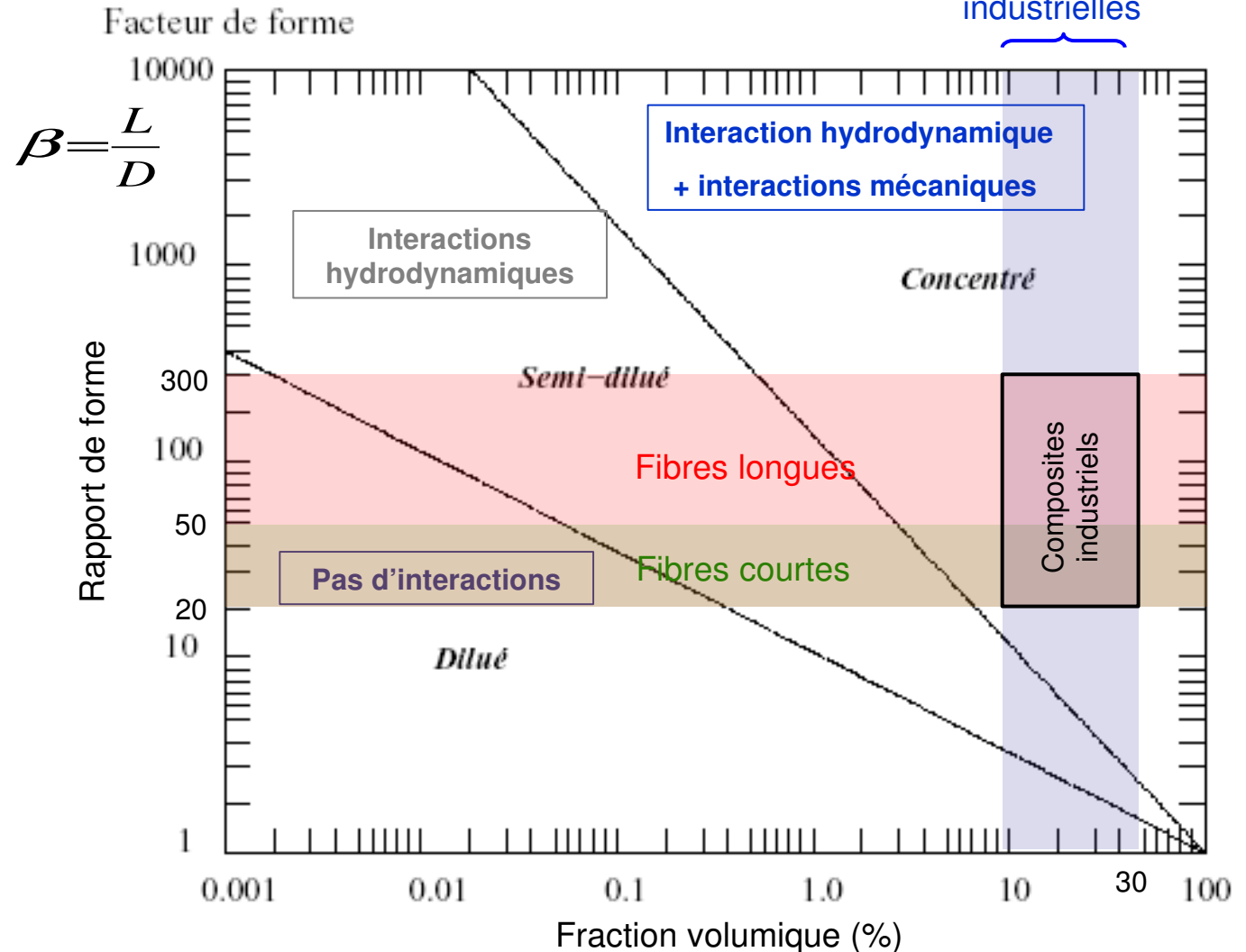
• Loi de comportement

Les régimes de concentration de fibres



Domaine de validité d'une loi de comportement

Concentrations
industrielles



Modélisation de l'orientation des fibres

[Jeffery 1922]

[Folgar et Tucker 1984]

Orientation macroscopique d'une population de fibres

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

$C_I \rightarrow$ Coefficient d'interaction

Paramètre dépendant de la géométrie de la fibre

Tenseur des vitesses de déformation

Coefficient de diffusion

$$\frac{D \underline{\underline{a}}_{\underline{\underline{2}}}}{Dt} = \underline{\underline{\Omega}} \underline{\underline{a}}_{\underline{\underline{2}}} - \underline{\underline{a}}_{\underline{\underline{2}}} \underline{\underline{\Omega}} + \lambda (\dot{\underline{\underline{a}}}_{\underline{\underline{2}}} + \underline{\underline{a}}_{\underline{\underline{2}}} \dot{\underline{\underline{\varepsilon}}} - \underbrace{2 \underline{\underline{\varepsilon}} : \underline{\underline{a}}_{\underline{\underline{4}}}}_{\text{Approximation fermeture}}) + 2 C_I \dot{\underline{\underline{\varepsilon}}} (\underbrace{I_d - 3 \underline{\underline{a}}_{\underline{\underline{2}}}}_{\text{Interaction entre fibres}})$$

Tenseur d'orientation

Tenseur de rotation

Approximation fermeture

Interaction entre fibres

$$\left. \begin{aligned} \underline{\underline{a}}_{\underline{\underline{2}}} &= f(\underline{\underline{a}}_{\underline{\underline{4}}}) \\ \underline{\underline{a}}_{\underline{\underline{4}}} &= f(\underline{\underline{a}}_{\underline{\underline{6}}}) \\ \underline{\underline{a}}_{\underline{\underline{2n}}} &= f(\underline{\underline{a}}_{\underline{\underline{2n+2}}}) \end{aligned} \right\} \text{Approximation de fermeture} \rightarrow \underline{\underline{a}}_{\underline{\underline{4}}} = F(\underline{\underline{a}}_{\underline{\underline{2}}})$$

Linéaire

Naturelle 2D

Quadratique

Orthotropes

Hybride

ORS, ORF, ORL, ORT

Modèles retenus

Mécanismes

Modélisation

Régimes concentration

équation d'orientation

Loi de comportement

Méthode numérique

Résultats orientation

Résultats industriels

Couplage rhéologie orientation

□ Expression générale du tenseur des contraintes

Hydroscopiques

↳ Régime de concentration dilué à semi dilué

$$\underline{\underline{\sigma}} = -p \underline{\underline{I}}_d + 2\underline{\underline{\eta}} \underline{\underline{\dot{\epsilon}}} + \underline{\underline{\Sigma}}_p$$

↳ Fibre rigide placée dans un fluide newtonien

Contribution de la matrice polymère Contribution des fibres

□ Expression générique d'une loi de comportement pour les matériaux chargés

[Tucker, 1991]

Équation de fermeture (quadratique) $(\underline{\underline{\dot{\epsilon}}} : \underline{\underline{a}}_2) \underline{\underline{a}}_2$

$$\underline{\underline{\sigma}} = -p \underline{\underline{I}}_d + 2\underline{\underline{\eta}}_I [\underline{\underline{\dot{\epsilon}}} + N_p \underline{\underline{\dot{\epsilon}}} : \underline{\underline{a}}_2] + N_s (\underline{\underline{\dot{\epsilon}}} \underline{\underline{a}}_2 + \underline{\underline{a}}_2 \underline{\underline{\dot{\epsilon}}})$$

$$\eta_I = f(\phi, \eta)$$

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

Contribution de la matrice et des fibres à la viscosité

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

$$N_s = f''(\phi, \beta)$$

$$0 \leq N_p \leq 100$$

$$N_s \ll N_p$$

Loi de comportement considérée dans l'isotropie due aux fibres plus réaliste

N_s } Cinématique fibres
 N_p }

- Modèles retenus
- Mécanismes
- Modélisation
- Régimes concentration
- équation d'orientation
- Loi de comportement

➤ Méthode numérique

➤ Résultats orientation

➤ Résultats industriels

Plan de la présentation

➤ Modèles retenus

❑ Modèles d'orientation issus de la bibliographie

- ❑ Mécanismes et modèle d'orientation macroscopique de l'orientation de fibres
- ❑ Couplage rhéologie/orientation via une loi de comportement adaptée

➤ Méthode numérique

❑ Méthodes numériques

- ❑ Méthode éléments finis mixtes appliquée au problème mécanique
- ❑ Méthode de Taylor Galerkin Discontinue Espace-temps pour l'orientation
- ❑ Algorithme de résolution

➤ Résultats orientation

❑ Orientation des fibres dans des géométries simples

- ❑ Validation du code de calcul
- ❑ Géométries simples : Poiseuille, contraction plane, Contraction expansion

➤ Résultats industriels

❑ Vers une application industrielle

- ❑ La plaque seuil
- ❑ La traverse nervurée

Méthode numérique

□ Equations mises en jeu Hypothèse d'incompressibilité

Forces de masse et d'inertie
négligeables

$$\nabla \cdot (2\eta I \underline{\underline{\varepsilon}}(\underline{v}) + N_s(\underline{\underline{\varepsilon}}(\underline{v}) \underline{\underline{a}}_2 + \underline{\underline{a}}_2 \underline{\underline{\varepsilon}}(\underline{v}))) + N_p (\underline{\underline{\varepsilon}}(\underline{v}) : \underline{\underline{a}}_2) \underline{\underline{a}}_2 - \nabla p = 0$$

$$\nabla \cdot \underline{v} = 0$$

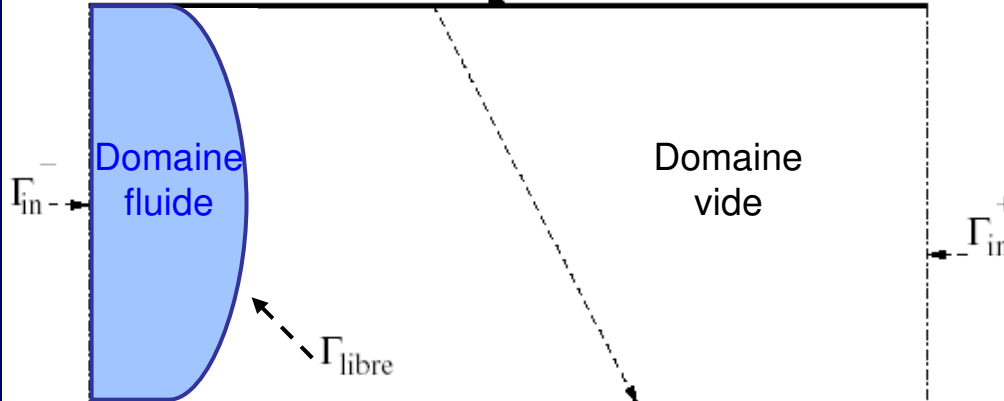
$$\frac{D \underline{\underline{a}}_2}{Dt} = \underline{\underline{\Omega}}(\underline{v}) \underline{\underline{a}}_2 - \underline{\underline{a}}_2 \underline{\underline{\Omega}}(\underline{v}) + \lambda (\underline{\underline{\varepsilon}}(\underline{v}) \underline{\underline{a}}_2 + \underline{\underline{a}}_2 \underline{\underline{\varepsilon}}(\underline{v}) - 2 \underline{\underline{\varepsilon}}(\underline{v}) : \underline{\underline{a}}_4) + 2C_I \dot{\underline{\underline{\varepsilon}}}(I - 3\underline{\underline{a}}_2)$$

$$\underline{\underline{a}}_4 = F(\underline{\underline{a}}_2)$$

□ Conditions aux limites

Frontière Γ_{pa}

Contact collant : $\Gamma_{pa} \quad \underline{v} = \underline{0}$



Condition de
vitesse/pression :

$$\Gamma_{in} \quad \underline{v} = \underline{v}_d(x)$$

$$\underline{v} - (\underline{v} \cdot \underline{n}) \underline{n}$$

$$(\underline{\underline{\sigma}} \underline{n}) \cdot \underline{n} = -p_d$$

Orientation initiale :

$$\Gamma_{in}$$

Condition de surface libre : $\Gamma_{libre} \quad \underline{\underline{\sigma}} \underline{n} = \underline{0}$

➤ Modèles retenus

➤ Méthode numérique

• Equations et CL

• EF mixte P1+/P1

• Méthode TGD ET

• Linéarisation

• Algorithme

➤ Résultats orientation

➤ Résultats industriels

Méthode numérique

□ Méthode élément fini mixte P1+/P1 appliquée au problème mécanique

- Interpolation linéaire en vitesse / Pression
- Interpolation en vitesse enrichie d'une fonction bulle (condition de compatibilité)

Formulation faible discrète (équation de Stokes généralisées) :

Trouver $(\underline{v}_h, b_h, p_h) \in V_h \times B_h \times P_h$ tel que $(\underline{w}_h, b_h^*, q_h) \in V_h \times B_h \times P_h$:

$$\int_{\Omega} 2\eta \underline{\underline{\varepsilon}}(\underline{v}_h) : \underline{\underline{\varepsilon}}(\underline{w}_h) d\Omega + \int_{\Omega} 2\eta N_p(\underline{\underline{\varepsilon}}(\underline{v}_h) : \underline{\underline{a}}_2)(\underline{\underline{a}}_2 : \underline{\underline{\varepsilon}}(\underline{w}_h)) d\Omega - \int_{\Omega} p_h \nabla \cdot \underline{w}_h d\Omega$$

$$= \int_{\Omega} 2\eta N_s(\underline{\underline{\varepsilon}}(\underline{w}_h) \underline{\underline{a}}_2 + \underline{\underline{a}}_2 \underline{\underline{\varepsilon}}(\underline{w}_h)) d\Omega$$

$$\int_{\Omega} 2\eta \underline{\underline{\varepsilon}}(b_h) : \underline{\underline{\varepsilon}}(b_h^*) d\Omega + \int_{\Omega} 2\eta N_p(\underline{\underline{\varepsilon}}(b_h) : \underline{\underline{a}}_2)(\underline{\underline{a}}_2 : \underline{\underline{\varepsilon}}(b_h^*)) d\Omega - \int_{\Omega} p_h \nabla \cdot b_h^* d\Omega = 0$$

$$- \int_{\Omega} q_h \nabla \cdot \underline{v}_h d\Omega - \int_{\Omega} q_h \nabla \cdot b_h d\Omega = 0$$

Approche découplée : $\underline{\underline{a}}_2$ connu

□ Système algébrique :

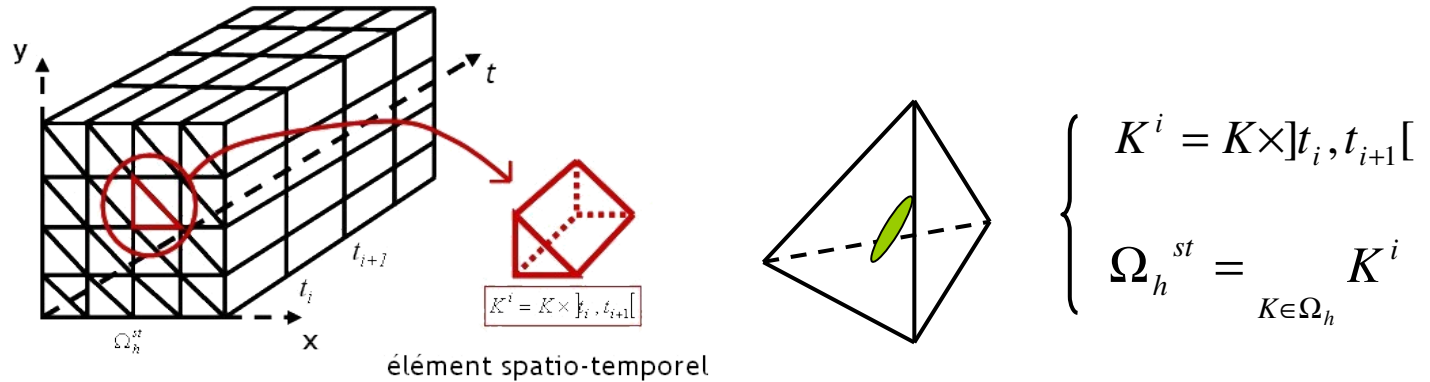
$$\begin{pmatrix} A_{vv} & 0 & B_{vp} \\ 0 & A_{bb} & B_{bp} \\ B_{vp}^T & B_{bp}^T & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V \\ V_b \\ P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Méthode itérative

Méthode numérique

□ Méthode TGD espace temps appliquée au calcul de l'orientation

↳ Résolution simultanée du problème en espace et en temps sur un élément spatio-temporel [Batkam, Bruchon, Toll, Coupez 2002]



2D : Maillage et élément spatio-temporel Élément K (3D) structuré en temps

Avantage de la méthode



Méthode inconditionnellement stable
Réduction des temps de calcul

□ Interpolation sur l'élément fini spatio- temporel

Interpolation discontinue sur K^i

$$a_{=K^i} = a_{=K,i} = \sum_{j=0}^n a_{=K,i} (t - \bar{t}_i)^j \quad \forall t \in]t_i, t_{i+1}[\quad \forall K \in \Omega_h$$

- Polynomiales P^n en temps
- Bas degré P^0 en espace

(n+1) inconnues sur l'élément spatio-temporel $K^i = K \times]t_i, t_{i+1}[$

- Modèles retenus
- Méthode numérique
 - équations et CL
 - EF mixte P1+/P1
 - Méthode TGD ET
 - Linéarisation
 - Algorithme
- Résultats orientation
- Résultats industriels

Méthode numérique

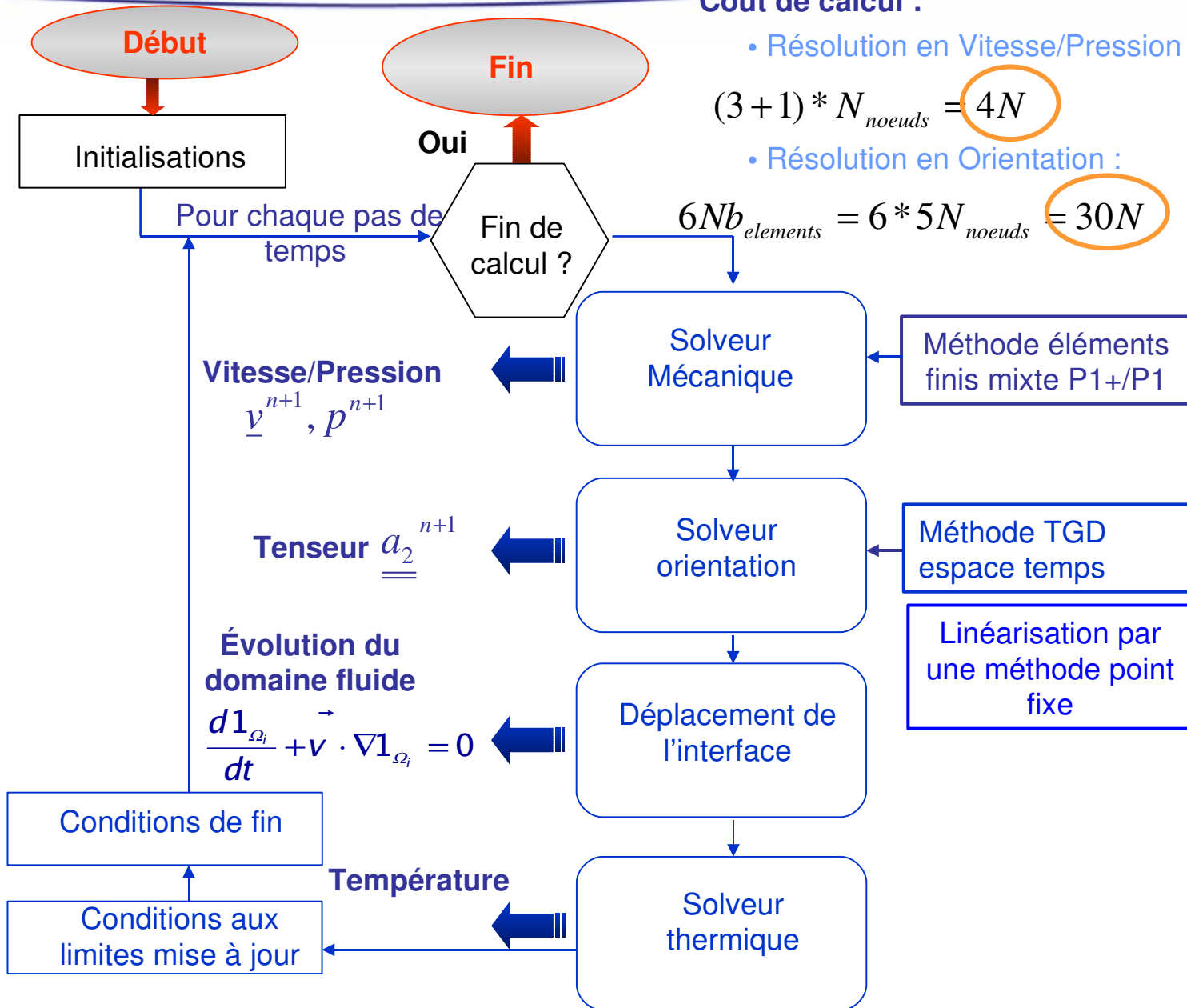
Coût de calcul :

- Résolution en Vitesse/Pression :

$$(3 + 1) * N_{noeuds} = 4N$$

- Résolution en Orientation :

$$6Nb_{elements} = 6 * 5N_{noeuds} = 30N$$



➤ Modèles retenus

➤ Méthode numérique

- équations et CL

- EF mixte P1+/P1

- Méthode TGD ET

- Linéarisation

- Algorithme

➤ Résultats orientation

➤ Résultats industriels

Plan de la présentation

➤ Modèles retenus

❑ Modèles d'orientation issus de la bibliographie

- ❑ Mécanismes et modèle d'orientation macroscopique de l'orientation de fibres
- ❑ Couplage rhéologie/orientation via une loi de comportement adaptée

➤ Méthode numérique

❑ Méthodes numériques

- ❑ Méthode éléments finis mixtes appliquée au problème mécanique
- ❑ Méthode de Taylor Galerkin Discontinue Espace-temps pour l'orientation
- ❑ Algorithme de résolution

➤ Résultats orientation

❑ Orientation des fibres dans des géométries simples

- ❑ Validation du code de calcul
- ❑ Géométries simples : Poiseuille, contraction plane, Contraction expansion

➤ Résultats industriels

❑ Vers une application industrielle

- ❑ La plaque seuil
- ❑ La traverse nervurée

Orientation dans des géométries simples

□ Conditions initiales et loi pour la rhéologie

Loi puissance pour la rhéologie : $\eta = \eta_0 |\dot{\gamma}|^{m-1}$

Loi d'Arrhenius (thermo dépendance) : $\eta_0(T) = \eta_0(T_{ref}) \exp \left[\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right]$

Rhéologie

Thermique

Indice m :	0.75
Consistance :	0.00123 MPa.s
Densité :	1000 kg/m ³

Tref :	300 °C
β :	3027.76
Conductivité :	0.1814 W/m °C
Chaleur spécifique :	2180 J/kg °C

□ Conditions initiales pour l'équation de Folgar et Tucker

Orientation initiale :	isotrope 3D
Équation de fermeture :	quadratique
Coefficient d'interaction :	CI = 0.01
Rapport de forme :	10
Coefficient de couplage :	0

➤ Modèles retenus

➤ Méthode numérique

➤ Résultats orientation

• CI et Loi matière

• Poiseuille 2D

• La contraction plane

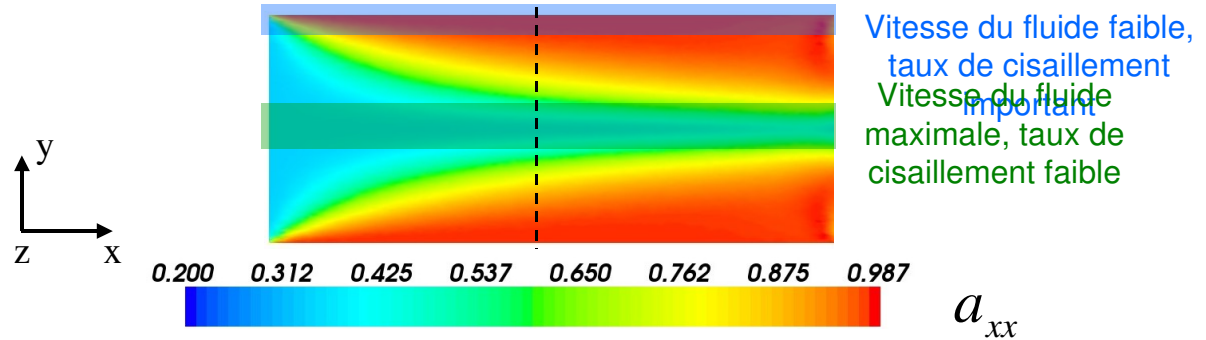
• Injection moule 3D

• Contraction expansion

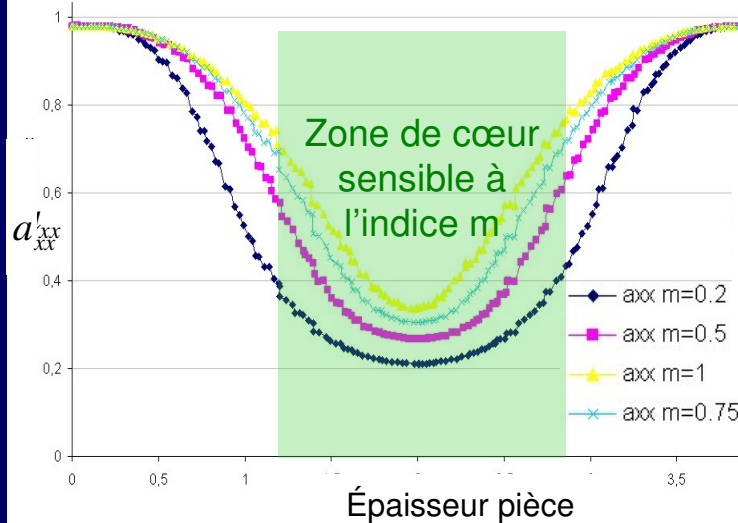
➤ Résultats industriels

Extrusion : Poiseuille 2D

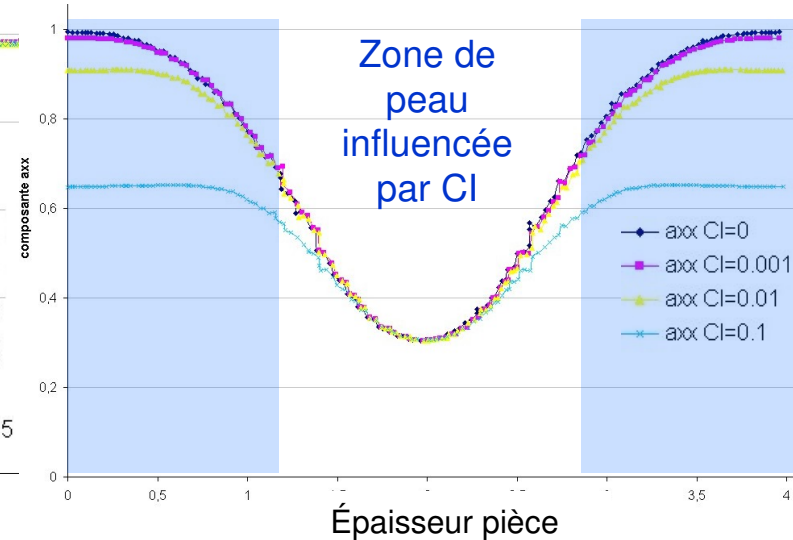
Écoulement de Poiseuille 2D : mécanismes d'orientation



Sensibilité de l'indice m



Sensibilité au coefficient Cl



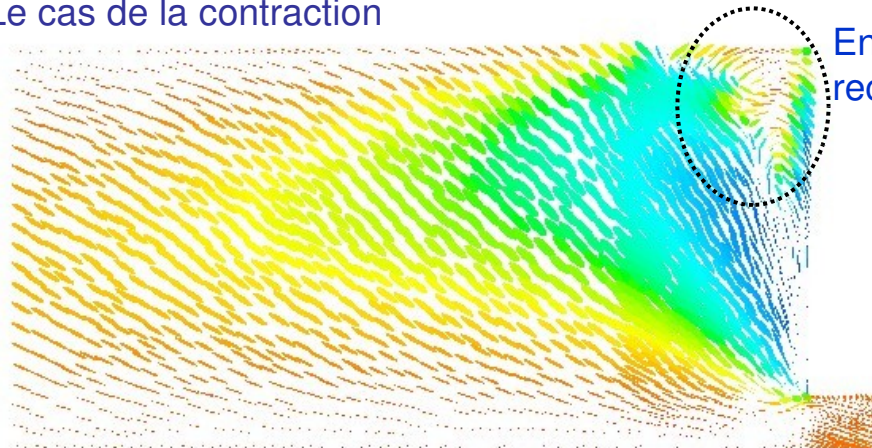
L'indice de pseudoplasticité joue un rôle majeur sur la taille et l'intensité de la zone de cœur

Le coefficient d'interaction a tendance à accroître le désalignement moyen des fibres

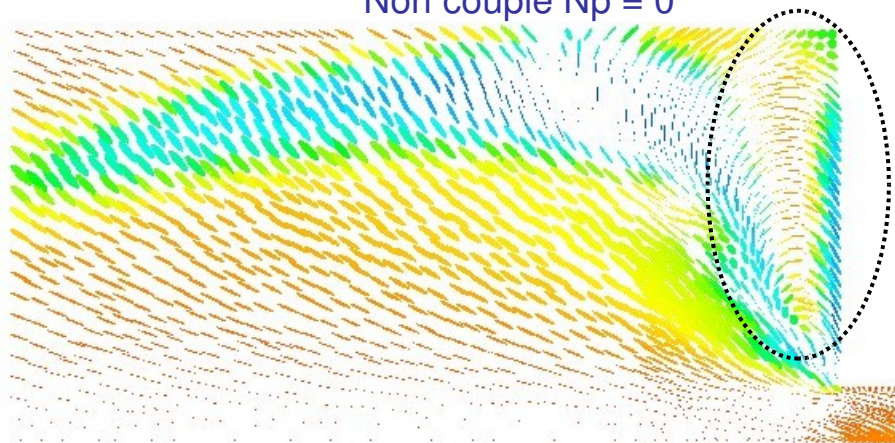
Le couplage rhéologie/orientation

□ Influence du paramètre rhéologique N_p sur l'orientation

Le cas de la contraction



Non couplé $N_p = 0$



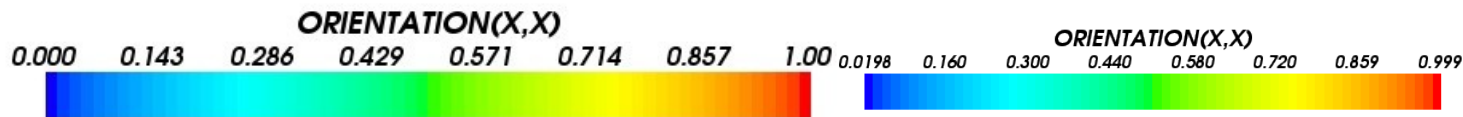
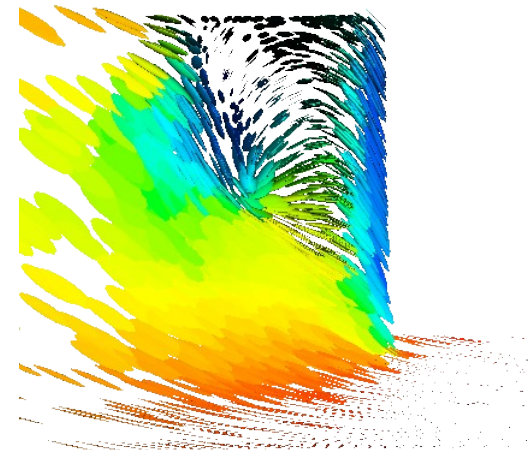
Modèle couplé $N_p = 10$

En Présence de zone de recirculations :

L'orientation des fibres s'effectue toujours suivant les lignes de courant en 2d

Interprétation non triviale

Calcul 3D :



➤ Modèles retenus

➤ Méthode numérique

➤ Résultats orientation

• Cl et Loi matière

• Poiseuille 2D

• La contraction plane

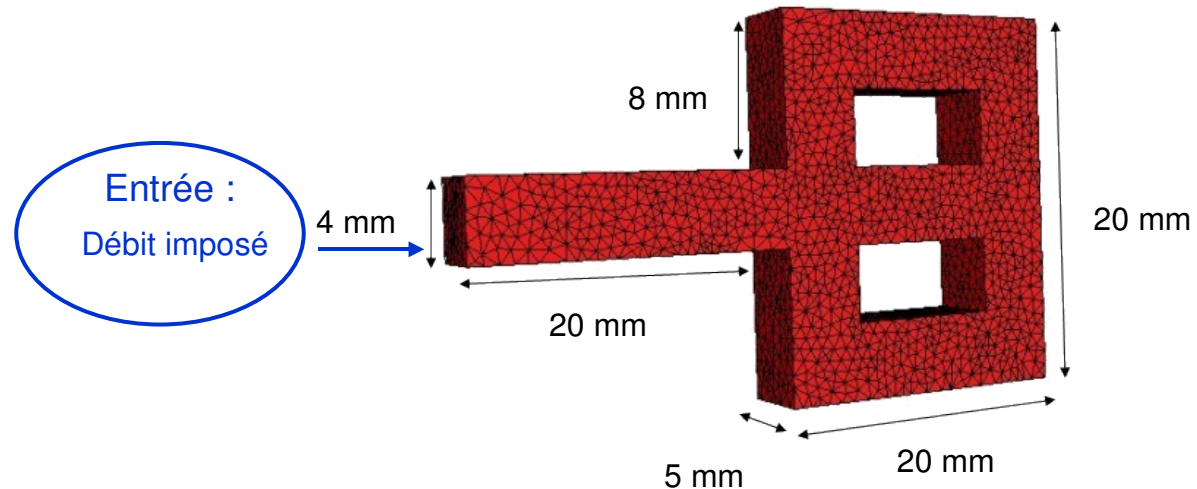
• Injection moule 3D

• Contraction expansion

➤ Résultats industriels

Injection d'un moule 3D

□ Géométrie et paramètres procédé



Dimension de la pièce : Longueur : 40 mm , largeur : 20 mm, épaisseur : 5 mm
Paramètre maillage : 55398 éléments, 11586 nœuds, 10 éléments dans l'épaisseur
Paramètre matériau : loi de comportement puissance thermo dépendante
Paramètre injection : débit : $200 \text{ mm}^3 / \text{s}$
température matériau : 260 °C température moule : 30 °C

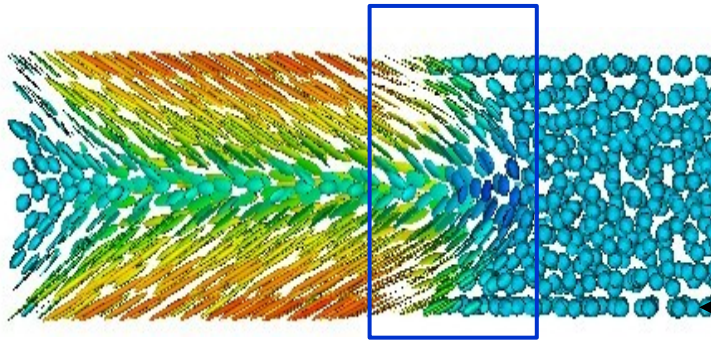
Injection d'un moule 3D

Formation des lignes de soudure

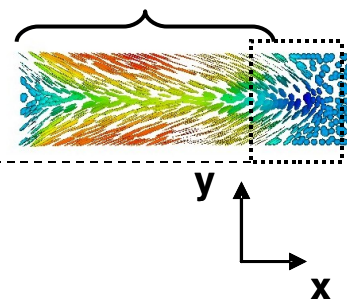
Temps de calcul : 57 min 41 s

Coupe dans l'épaisseur de la pièce

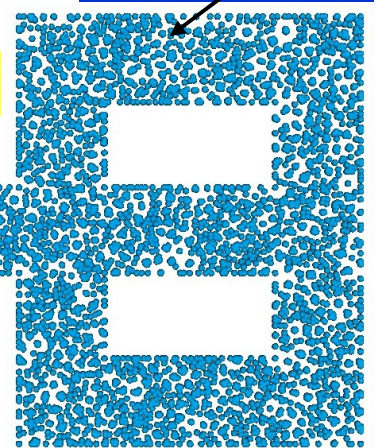
Effet fontaine



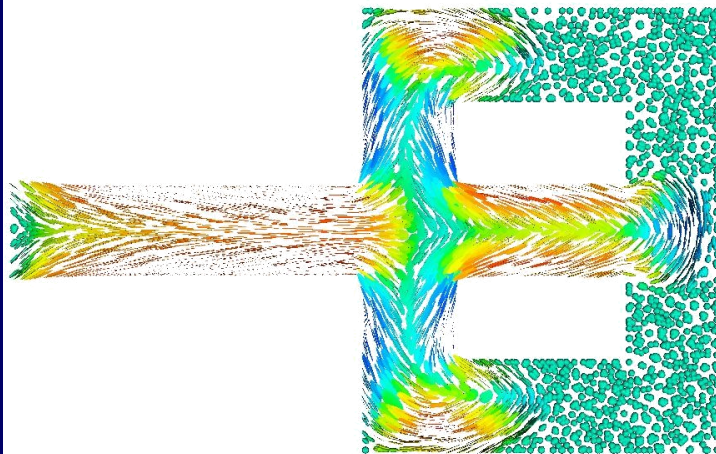
Domaine fluide



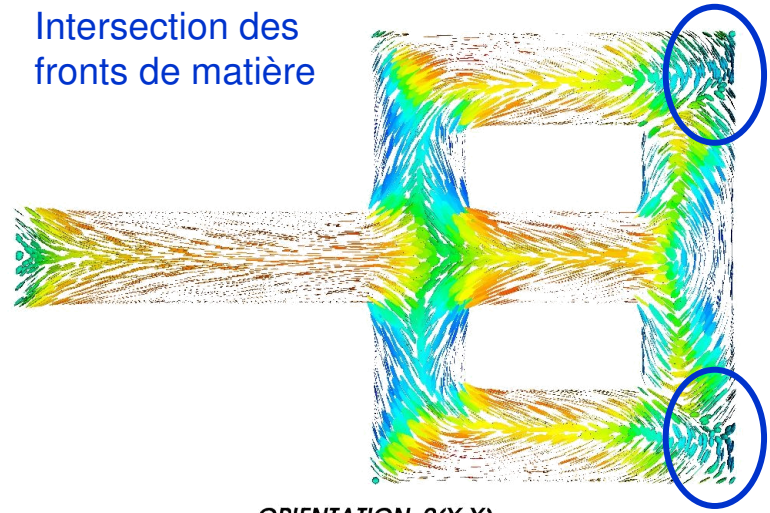
Domaine vide



Évolution de a_{xx} :



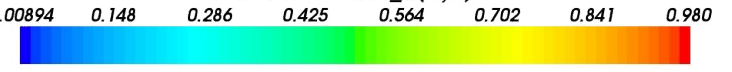
Intersection des fronts de matière



ORIENTATION_0(X,X)



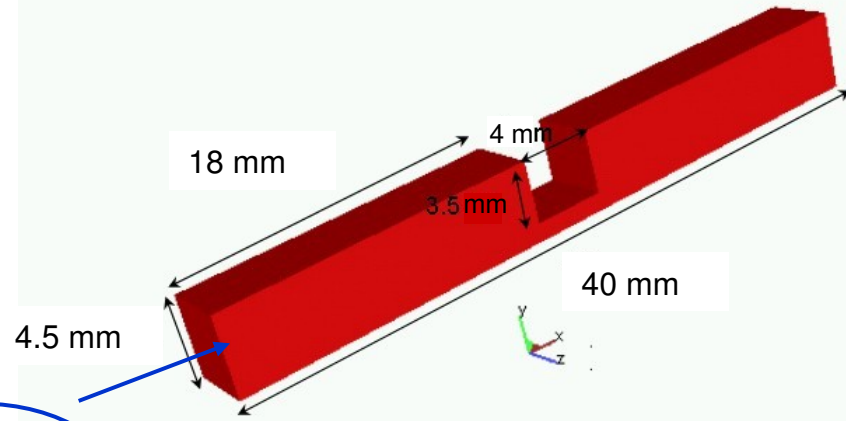
ORIENTATION_0(X,X)



- Modèles retenus
- Méthode numérique
- Résultats orientation
- Cl et Loi matière
- Poiseuille 2D
- La contraction plane
- Injection moule 3D
- Contraction expansion
- Résultats industriels

La contraction expansion

□ Géométrie et conditions procédé (extrusion et injection)



Entrée :
Débit imposé

Plans de symétrie : $(z=4, x, y)$ et $(y=0, x, z)$

Paramètre maillage : 40060 éléments, 8540 nœuds

Paramètre matériau : loi de comportement puissance thermo dépendante

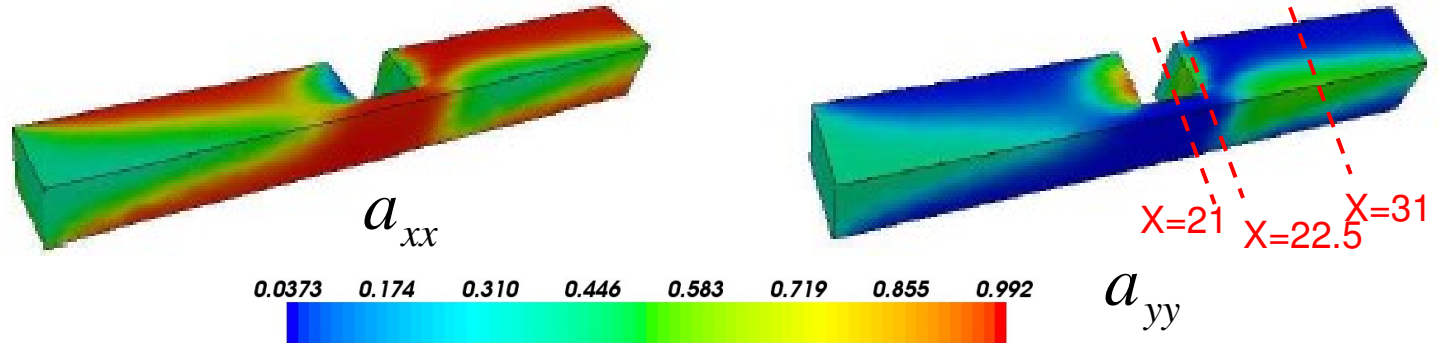
Paramètre injection : débit : $600 \text{ mm}^3 / \text{s}$

température matériau : $230 \text{ }^\circ\text{C}$ température moule : $30 \text{ }^\circ\text{C}$

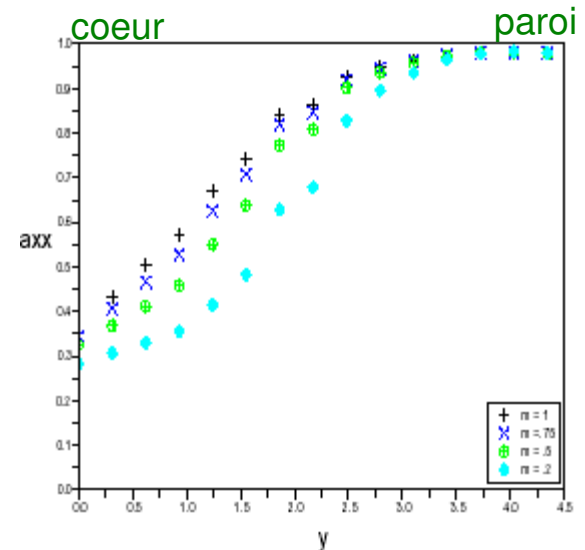
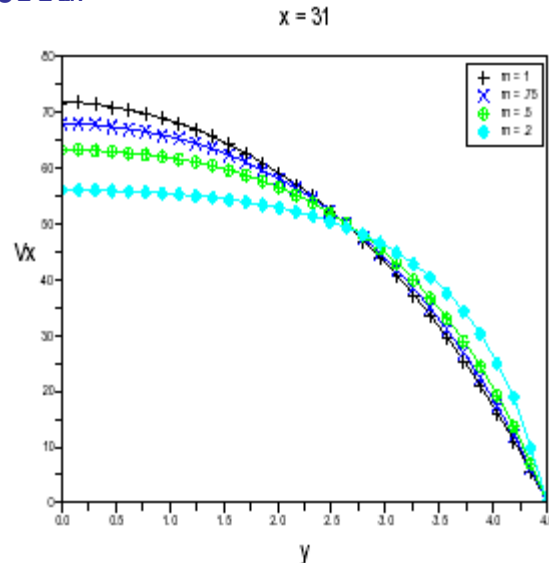
Pas de temps : 0.001

La contraction expansion

□ Extrusion : effet de la rhéologie de la matrice



- ↪ x=21 : l'effet rhéofluidifiant a une influence sur la composante V_x peu sur l'orientation
- ↪ x=22.5 : écoulement élongationnel. Pas d'influence de l'effet rhéofluidifiant
- ↪ x=31 : écoulement de cisaillement. L'effet rhéofluidifiant augmente la taille de la zone de coeur



➤ Modèles retenus

➤ Méthode numérique

➤ Résultats orientation

• Cl et Loi matière

• Poiseuille 2D

• La contraction plane

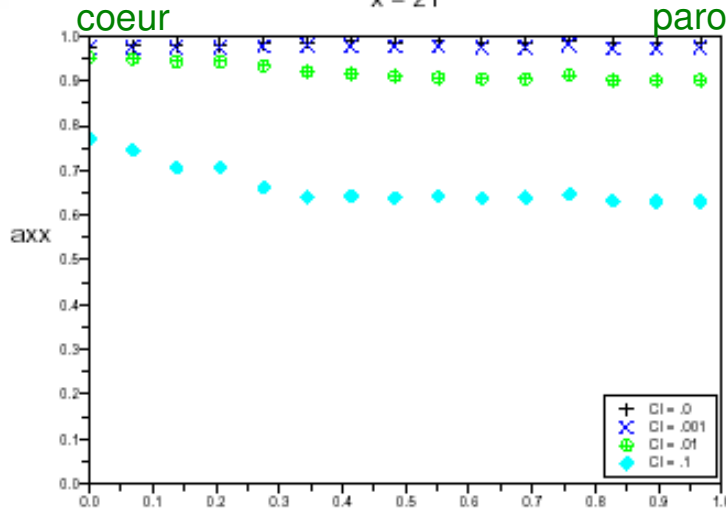
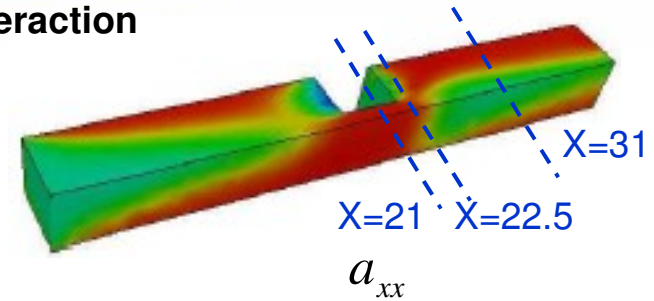
• Injection moule 3D

• **Contraction expansion**

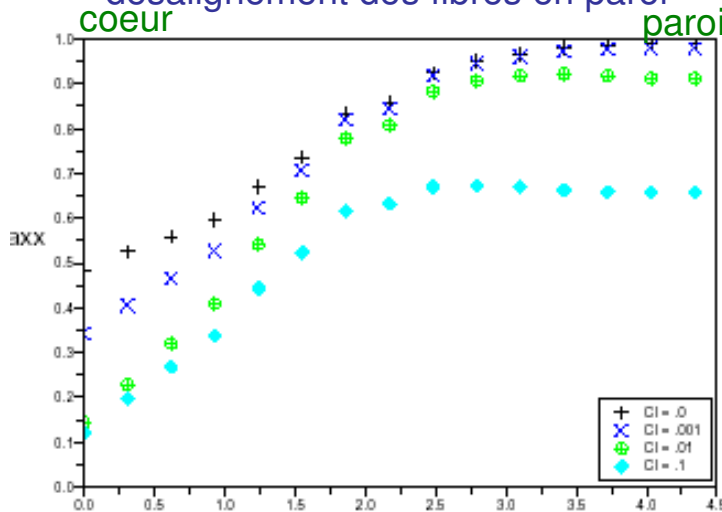
➤ Résultats industriels

La contraction expansion

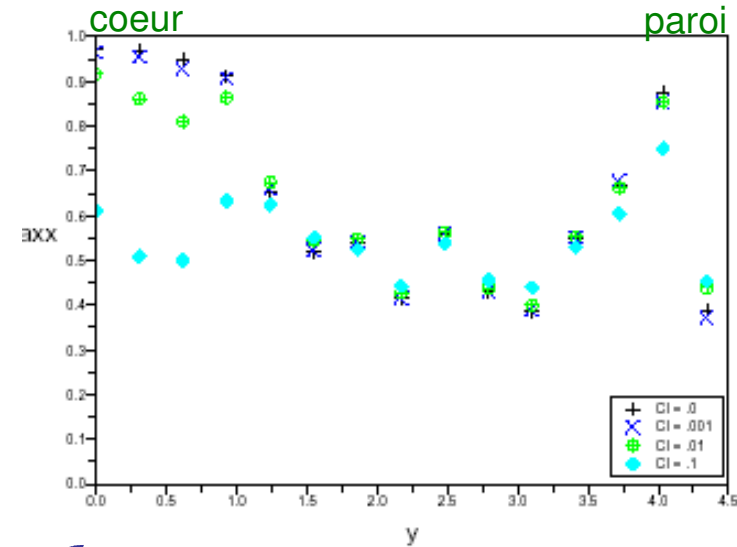
Extrusion : influence du coefficient d'interaction



x=21 : CI a une influence sur le désalignement des fibres en paroi



x=31 : influence de CI en zone de cœur et à la paroi



x=22.5 : l'influence de CI est plus importante au centre où l'écoulement élongationnel est le plus important

Modèles retenus

Méthode numérique

Résultats orientation

CI et Loi matière

Poiseuille 2D

La contraction plane

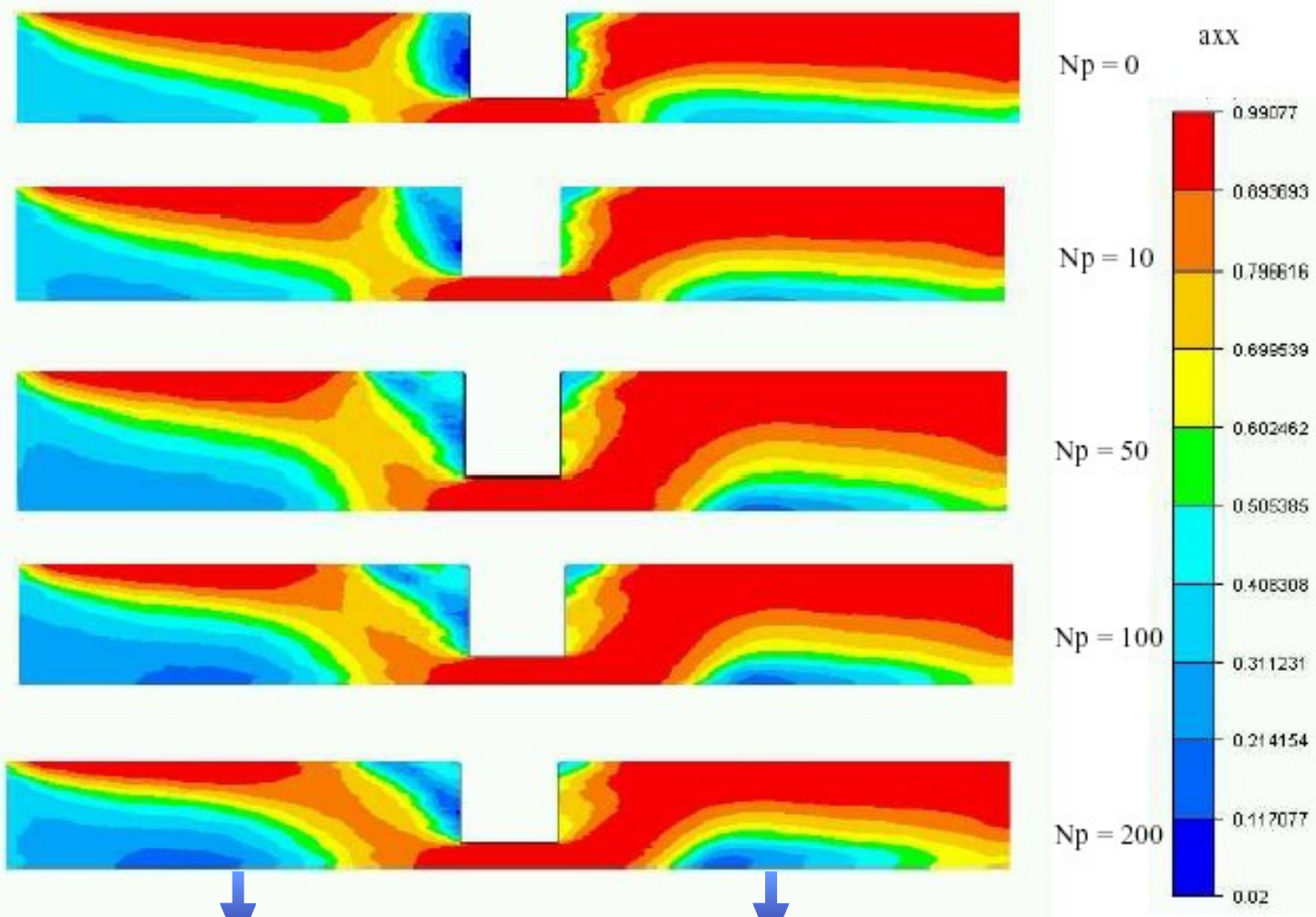
Injection moule 3D

Contraction expansion

Résultats industriels

La contraction expansion

□ Extrusion : effet du couplage rhéologie orientation

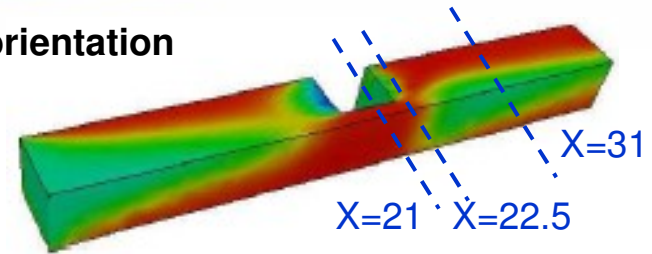


En présence du couplage,
élargissement de la zone de cœur,
minima de σ_{xx} plus faible

En présence du couplage la
zone de cœur est moins
longue et plus large

La contraction expansion

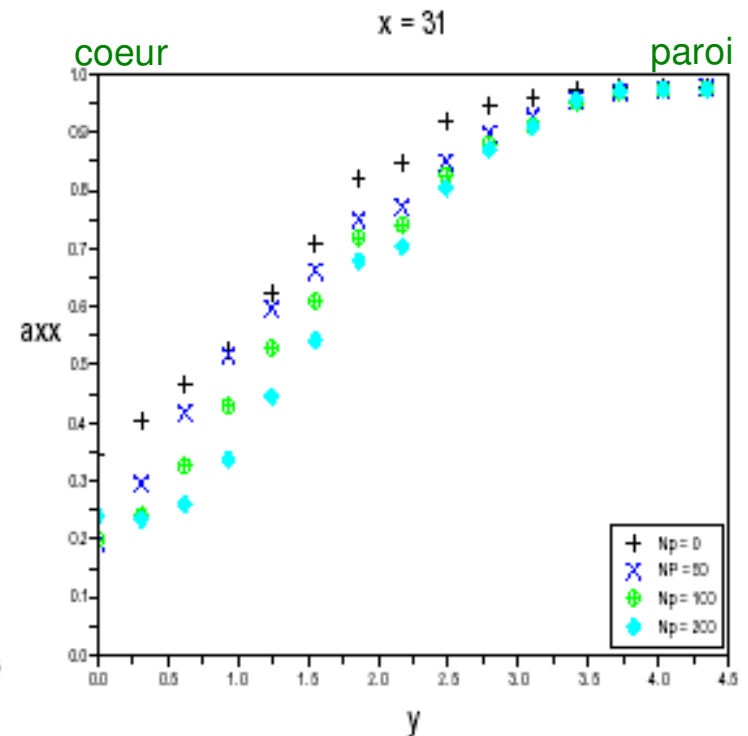
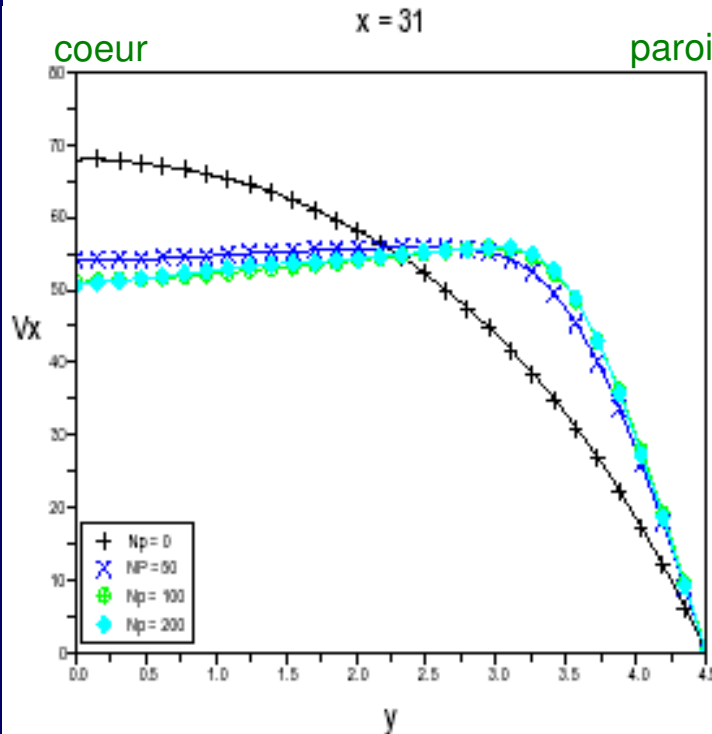
□ Extrusion : effet du couplage rhéologie orientation



↶ x=21 : Pas d'influence de N_p

↶ x=22.5 : le couplage agit de la même manière que l'indice m a_{xx}

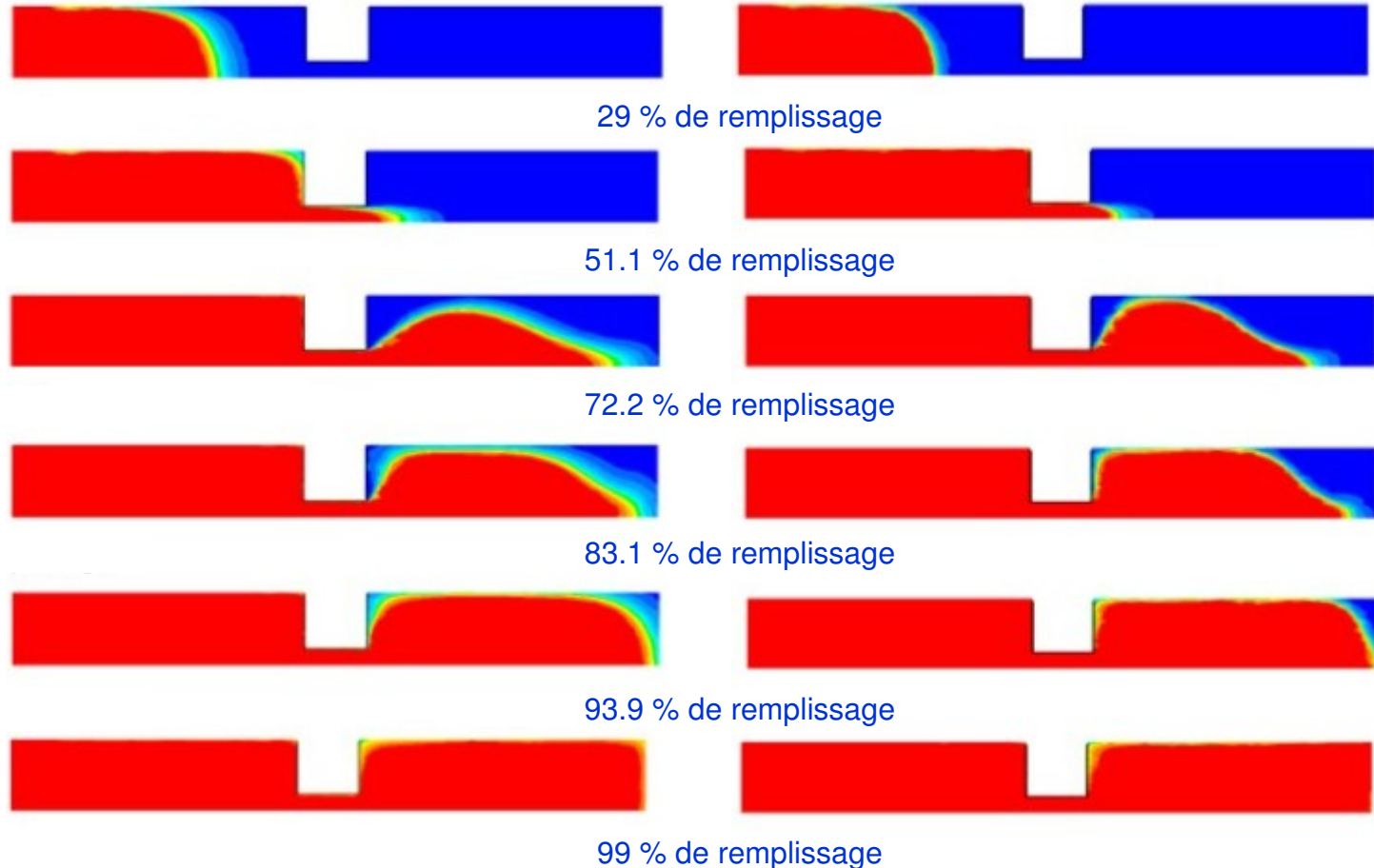
↶ x=31 : création d'un écoulement bouchon. Augmentation de la taille de la zone de cœur.



La contraction expansion

Injection : effet du couplage rhéologie orientation

Evolution de la surface libre à différents instants de remplissage



Cas non couplé $N_p=N_s=0$

Cas couplé : $N_p=50, N_s=0.08$



La forme et la position de la surface libre n'évoluent pas de manière similaire



La dynamique de remplissage est différente : léger gonflement en sortie de filière

La contraction expansion

Injection : effet du couplage rhéologie orientation

➤ Modèles retenus

➤ Méthode numérique

➤ Résultats orientation

• CI et Loi matière

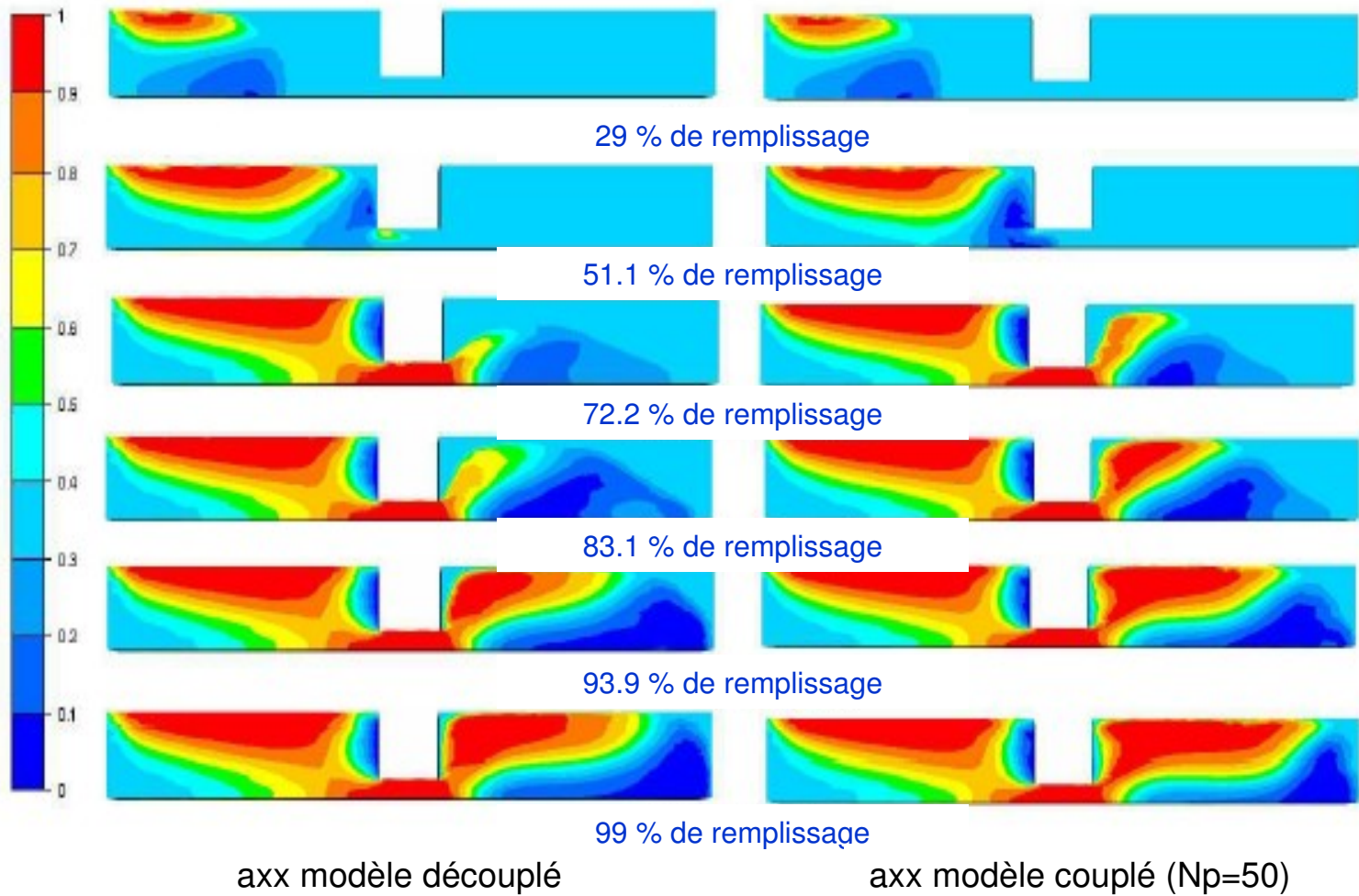
• Poiseuille 2D

• La contraction plane

• Injection moule 3D

• **Contraction expansion**

➤ Résultats industriels



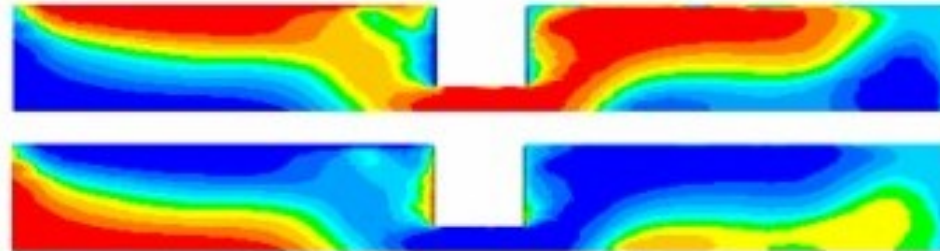
↩ L'orientation des fibres est quantitativement différente car la dynamique de remplissage n'est plus la même

La contraction expansion

Injection : influence de l'orientation initiale des fibres

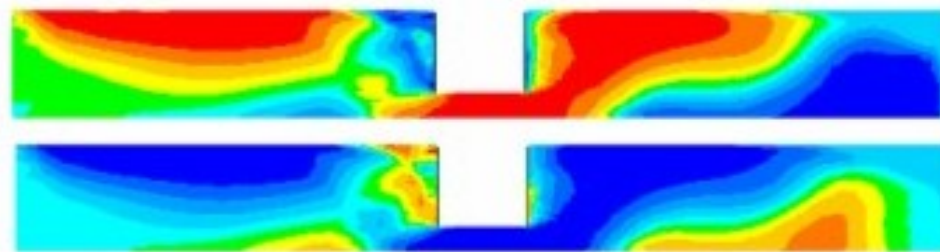
Modèle couplé
Np=50,
Ns=0.08

- Orientation initiale transverse à la direction d'écoulement



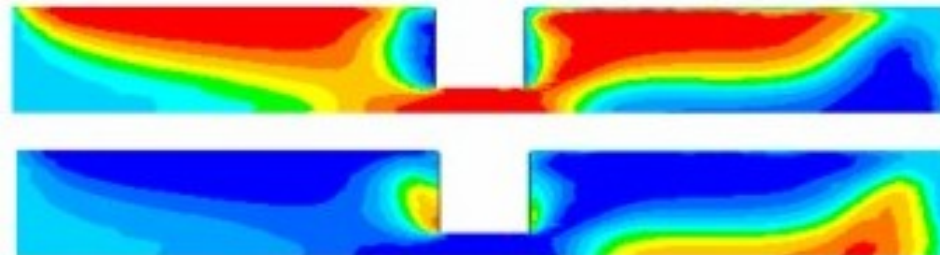
$$a_{xx} = a_{yy} \stackrel{t=0}{=} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

- Orientation initiale isotrope 2D dans le plan (x,y)

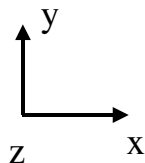


$$a_{xx} = a_{yy} \stackrel{t=0}{=} = \begin{pmatrix} 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

- Orientation initiale isotrope 3D



$$a_{xx} = a_{yy} \stackrel{t=0}{=} = \begin{pmatrix} 0.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3 \end{pmatrix}$$



L'orientation initiale des fibres joue un rôle important dans les zones où les fibres sont transportées

Modèles retenus

Méthode numérique

Résultats orientation

CI et Loi matière

Poiseuille 2D

La contraction plane

Injection moule 3D

Contraction expansion

Résultats industriels

Plan de la présentation

➤ Modèles retenus

❑ Modèles d'orientation issus de la bibliographie

- ❑ Mécanismes et modèle d'orientation macroscopique de l'orientation de fibres
- ❑ Couplage rhéologie/orientation via une loi de comportement adaptée

➤ Méthode numérique

❑ Méthodes numériques

- ❑ Méthode éléments finis mixtes appliquée au problème mécanique
- ❑ Méthode de Taylor Galerkin Discontinue Espace-temps pour l'orientation
- ❑ Algorithme de résolution

➤ Résultats orientation

❑ Orientation des fibres dans des géométries simples

- ❑ Validation du code de calcul
- ❑ Géométries simples : Poiseuille, contraction plane, Contraction expansion

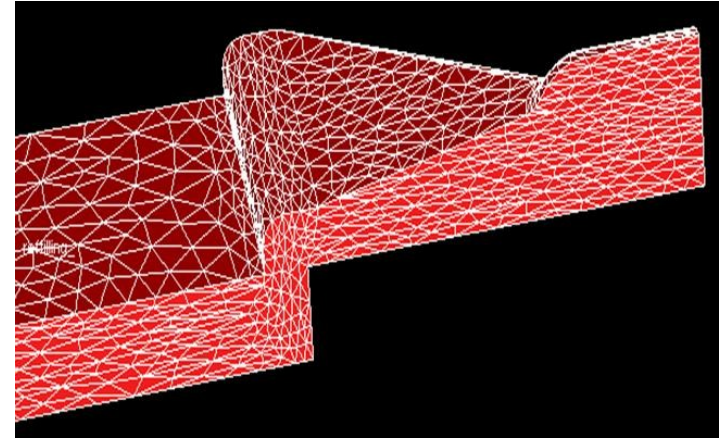
➤ Résultats industriels

❑ Validation et application industrielle

- ❑ La plaque seuil
- ❑ La traverse nervurée

La plaque seuil

□ Géométrie du seuil et maillage



□ Matériau utilisé et condition d'injec

Loi de Carreau Yasuda (rhéologie)

$$\eta = \eta_0 \left[1 + \left(\eta_0 \frac{\dot{\gamma}}{\tau_c} \right)^\alpha \right]^{\frac{m-1}{\alpha}}$$

Loi d'Arrhenius (thermo dépendance)

$$\eta_0(T) = \eta_0(T_{ref}) \exp \left[\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right]$$

Indice m : 0.4
 Consistance : 0.00027 MPa.s
 Densité : 1522 kg/m3

Tref : 275.85 °C
 β : 7664 mole.K
 Conductivité : 0.3 W/m °C
 Chaleur spécifique : 2180 J/kg °C

Équation de fermeture : hybride
 Coefficient d'interaction : CI = 0.001
 Rapport de forme : 10
 Coefficient de couplage : Np=100, Ns=0.08

➤ Modèles retenus

➤ Méthode numérique

➤ Résultats orientation

➤ Résultats industriels

• Seuil : Géométrie et CI

• Seuil : Résultats Num.

• Seuil : Corrélations

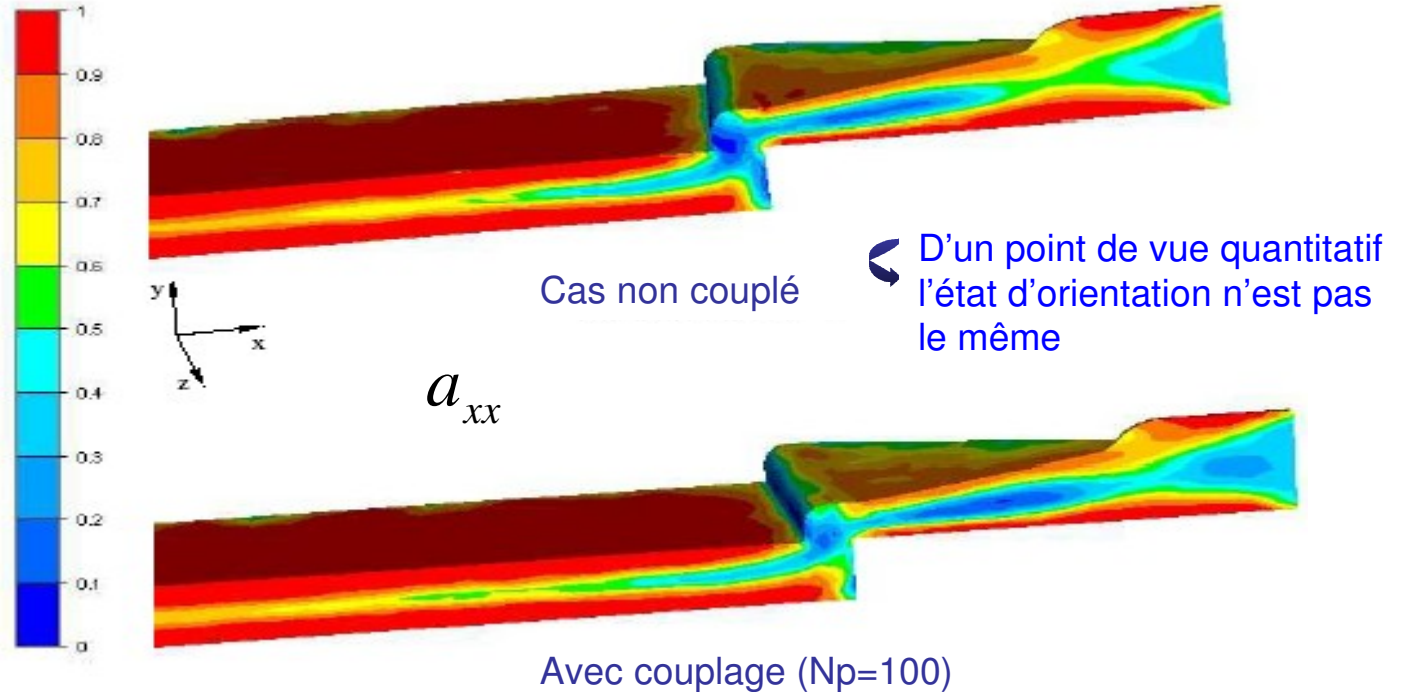
• Traverse : Géométrie

• Traverse : Résultats

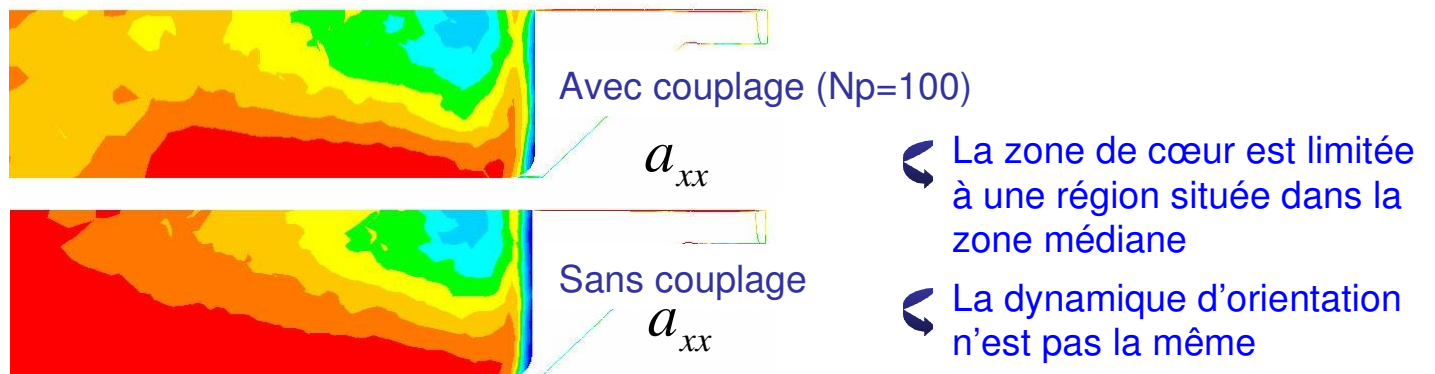
• Traverse : Corrélations

La plaque seuil

☐ Résultats numérique en injection (coupe 3D)



☐ Résultats numérique en injection (coupe dans le plan (x,z))



➤ Modèles retenus

➤ Méthode numérique

➤ Résultats orientation

➤ Résultats industriels

• Seuil : Géométrie et CI

• Seuil : Résultats Num.

• Seuil : Corrélations

• Traverse : Géométrie

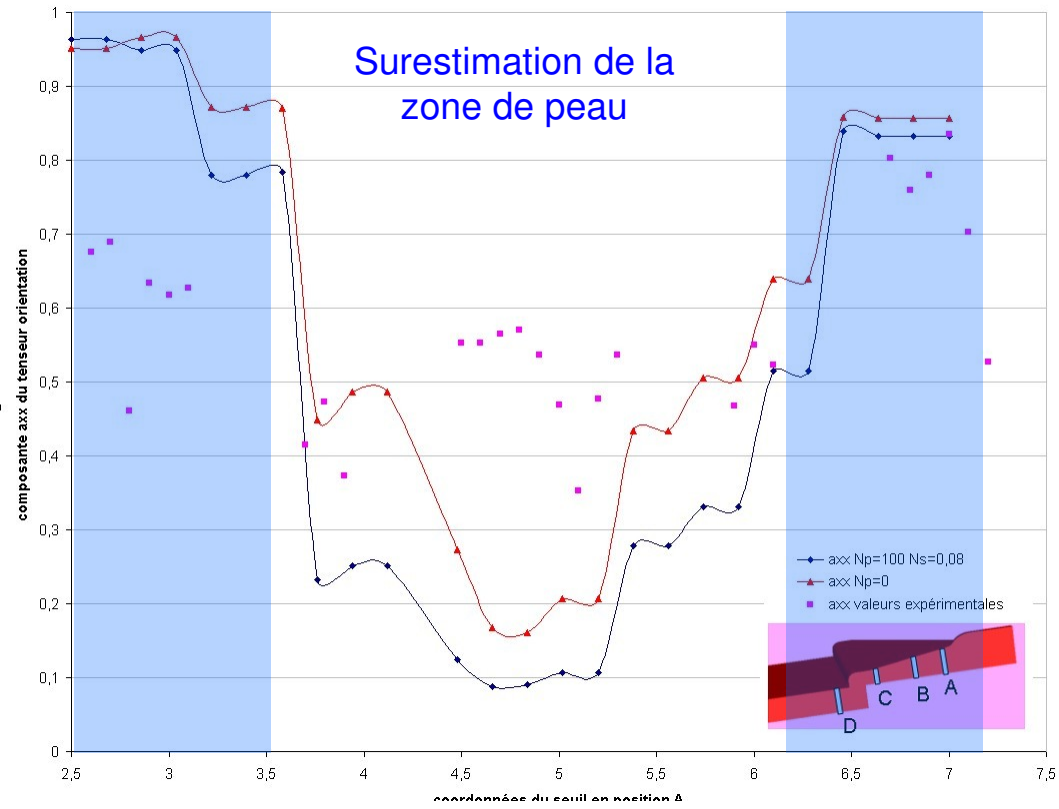
• Traverse : Résultats

• Traverse : Corrélations

La plaque seuil

❑ Corrélation Rem3D /mesures expérimentales – position A

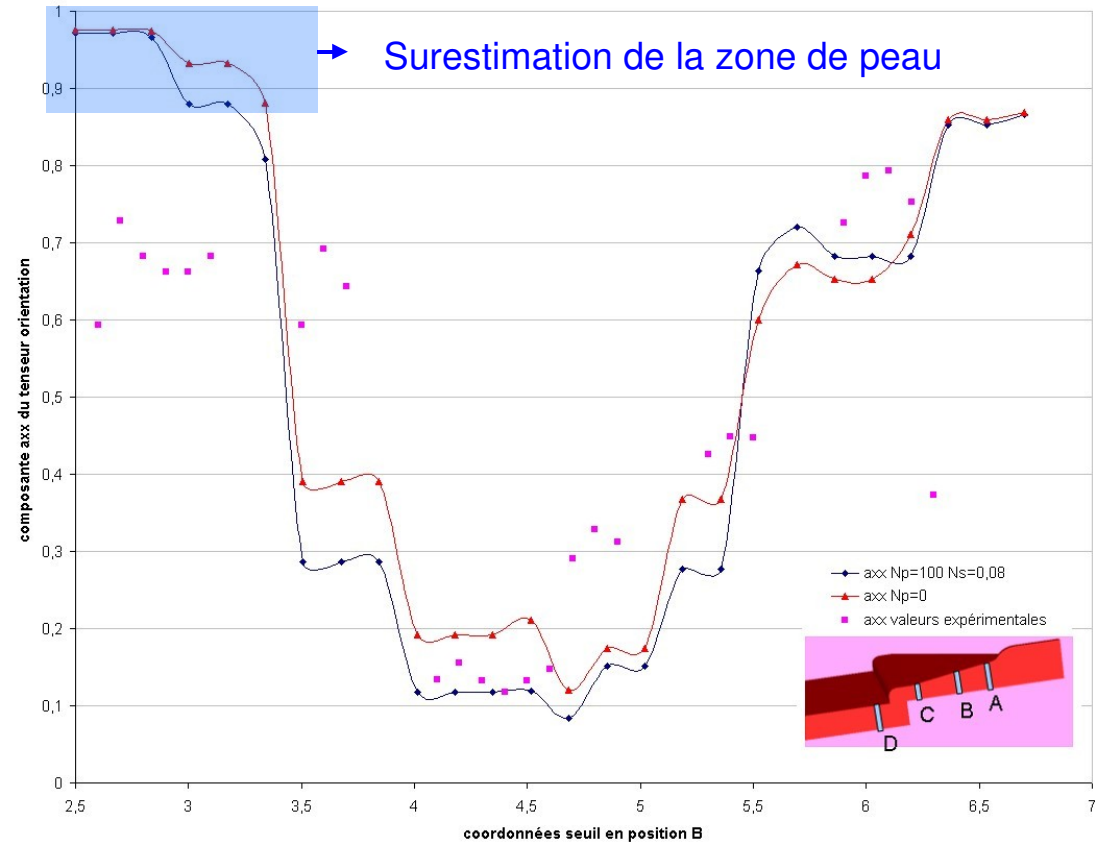
- ↳ Technique d'analyse d'image 2D (résultats issus de travaux antérieurs)
 - observation de la surface d'un échantillon préalablement poli
 - analyse de la surface au MEB
 - correction pour minimiser l'incertitude de la mesure expérimentale



- ↳ Le couplage prédit une zone de cœur plus importante à l'entrée du
- ↳ Pas de structure cœur peau marquée pour les valeurs expérimentales
- ↳ Prendre en compte dans le calcul le canal d'alimentation du moule ?

La plaque seuil

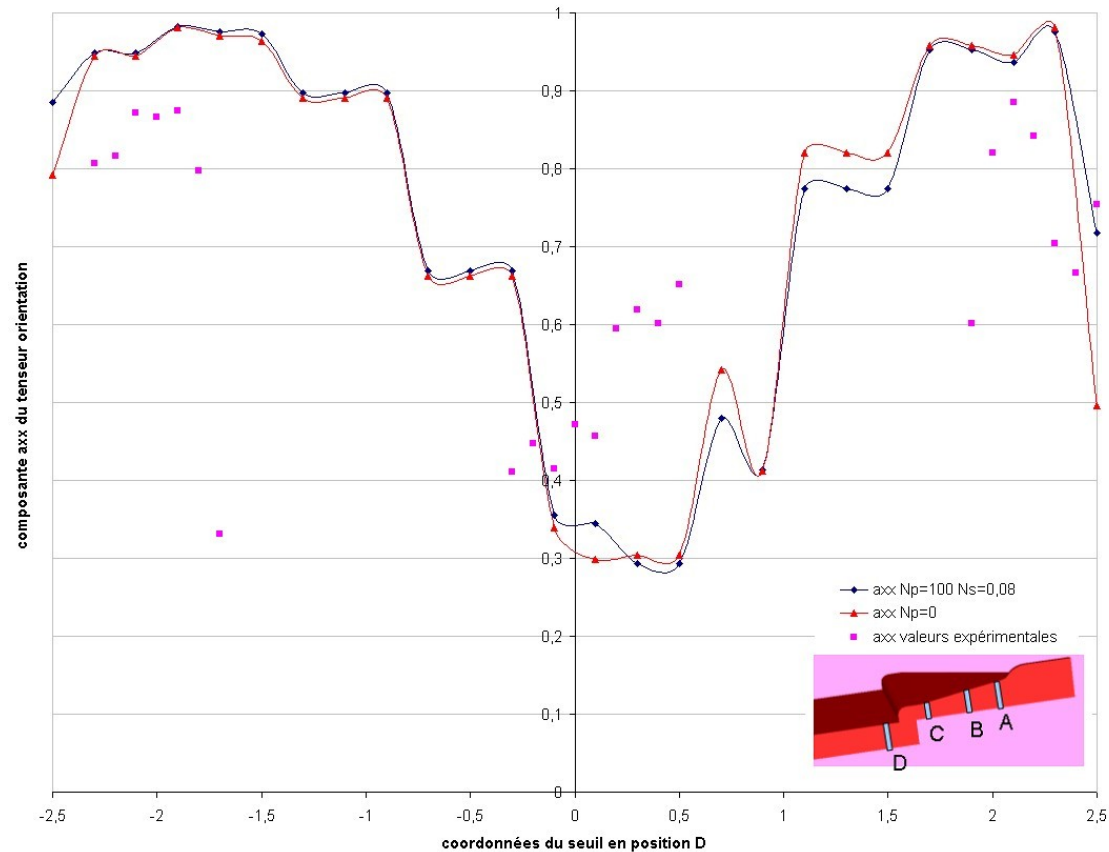
□ Corrélation Rem 3D /mesures expérimentales – position B



- Le couplage prédit une zone de cœur légèrement plus importante
- Effet du couplage moindre que dans la zone d'analyse A

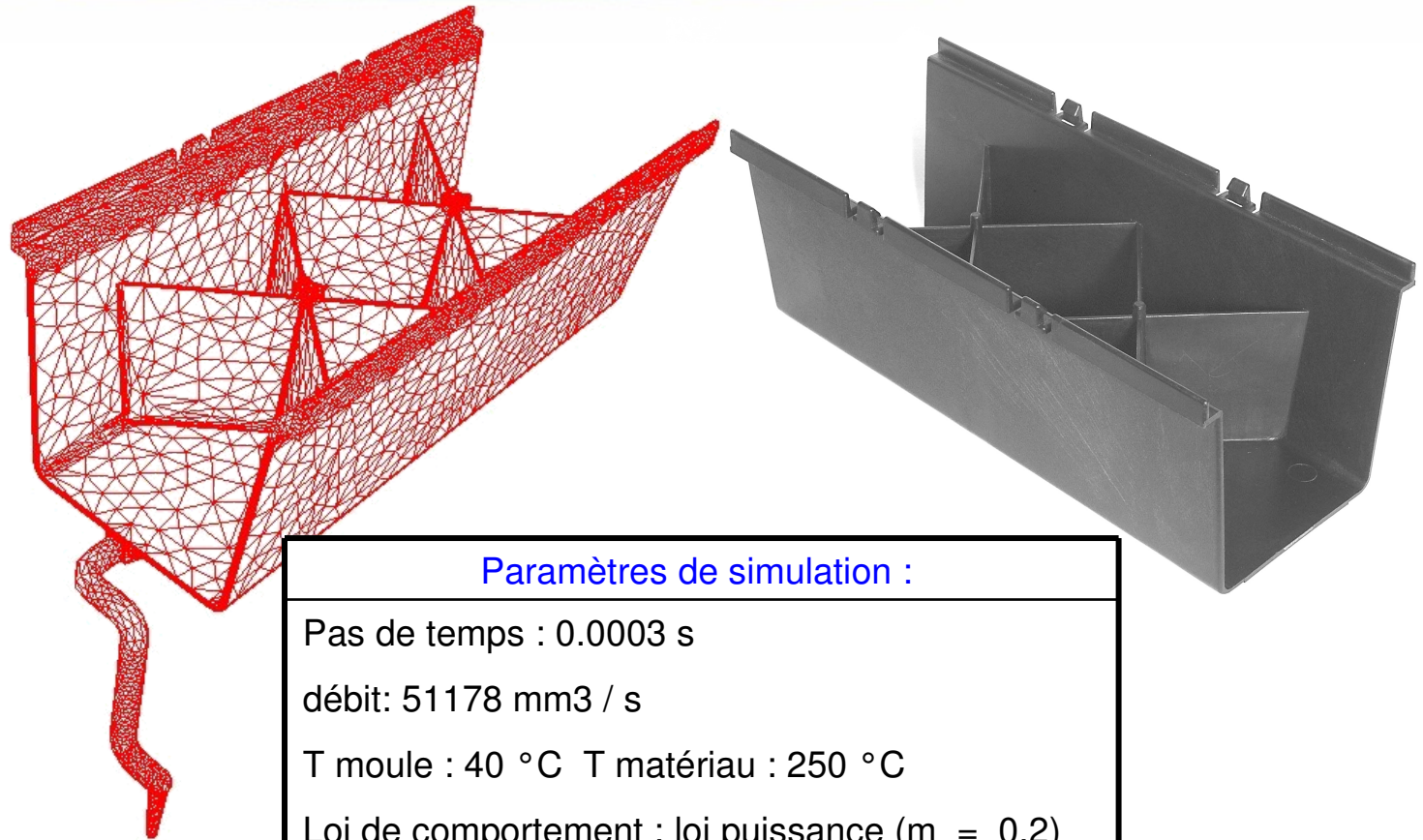
La plaque seuil

□ Corrélation Rem3D /mesures expérimentales – position D



↩ Peu d'effet du couplage sur l'orientation (écoulement de cisaillement)

La traverse nervurée



Paramètres de simulation :

Pas de temps : 0.0003 s

débit: 51178 mm³ / s

T moule : 40 °C T matériau : 250 °C

Loi de comportement : loi puissance ($m = 0.2$)

Paramètres maillage :

Nbr éléments : 266 054

Nbr noeuds : 53998

Nbr éléments/épaisseur : ~14

Paramètres d'orientation :

Rapport de forme : 10

CI = 0.001

Fermeture : Quadratique

$N_p = 0$

➤ Modèles retenus

➤ Méthode numérique

➤ Résultats orientation

➤ Résultats industriels

• Seuil : Géométrie et CI

• Seuil : Résultats Num.

• Seuil : Corrélations

• **Traverse : Géométrie**

• Traverse : Résultats

• Traverse : Corrélations

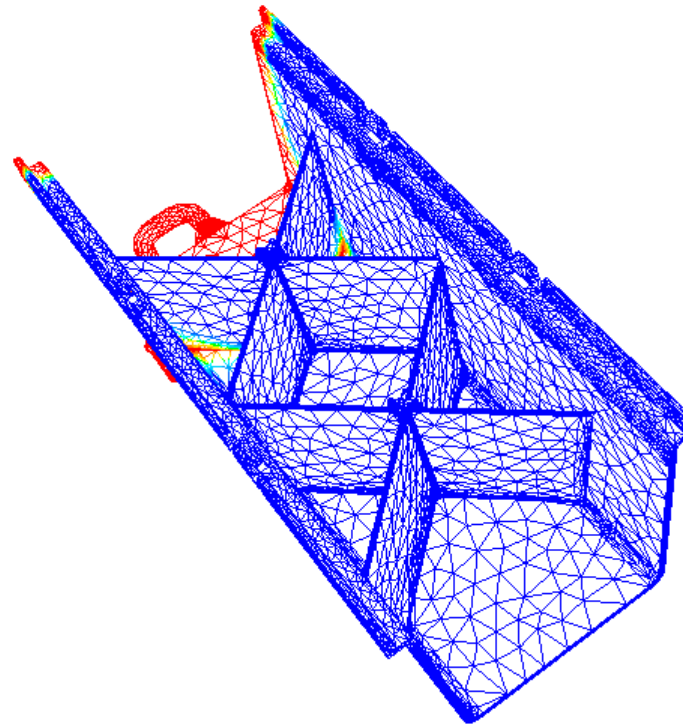
La traverse nervurée

❑ Remplissage de la pièce

Temps CPU : 191h 48 min

View 1
Case 1 [refilling_06419.in3]

Frin [1]



Frame: 1/152
Time: 0.274
Time: 0.274 s Full: 12.95 % Inc: 03100

GLview Inova 2005-11-24
AT: REM3D-Recherche DATAFILE : DATA_Filling.mtc CUSTOMER : CEMEF
Frin: Melt_1 [3D element]
Disp: Geometry Displacement

➤ Modèles retenus

➤ Méthode numérique

➤ Résultats orientation

➤ Résultats industriels

• Seuil : Géométrie et CI

• Seuil : Résultats Num.

• Seuil : Corrélations

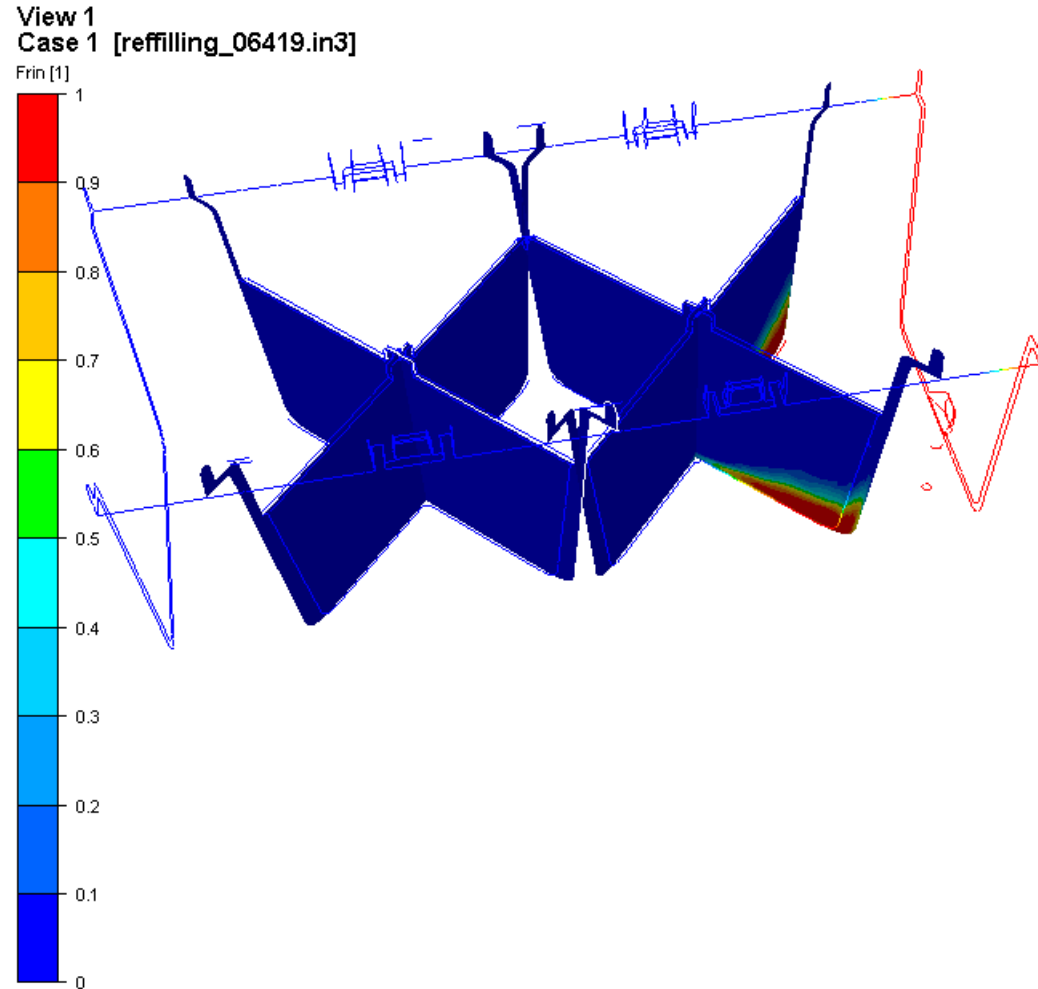
• Traverse : Géométrie

• **Traverse : Résultats**

• Traverse : Corrélations

La traverse nervurée

□ Remplissage des nervures



Frame: 1/152
Time: 0.274
Time: 0.274 s Full: 12.95 % Inc: 03100

GLview Inova 2005-11-23
AT: REM3D-Recherche DATAFILE : DATA_Filling.mtc CUSTOMER : CEMEF
Frin: Melt_1 [3D element]
Disp: Geometry Displacement

➤ Modèles retenus

➤ Méthode numérique

➤ Résultats orientation

➤ Résultats industriels

• Seuil : Géométrie et CI

• Seuil : Résultats Num.

• Seuil : Corrélations

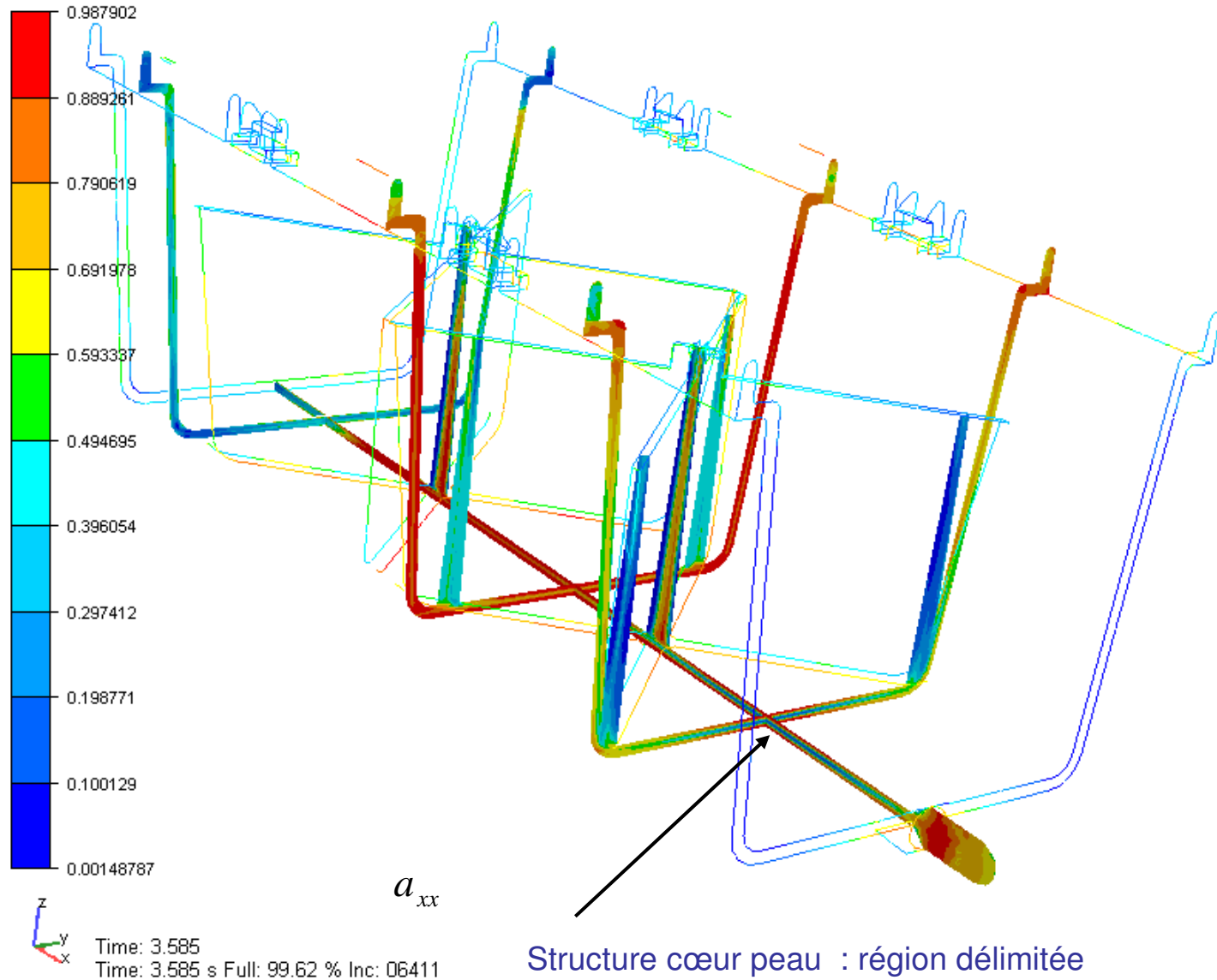
• Traverse : Géométrie

• **Traverse : Résultats**

• Traverse : Corrélations

La traverse nervurée

Orientation des fibres – structure cœur - peau



Modèles retenus

Méthode numérique

Résultats orientation

Résultats industriels

• Seuil : Géométrie et CI

• Seuil : Résultats Num.

• Seuil : Corrélations

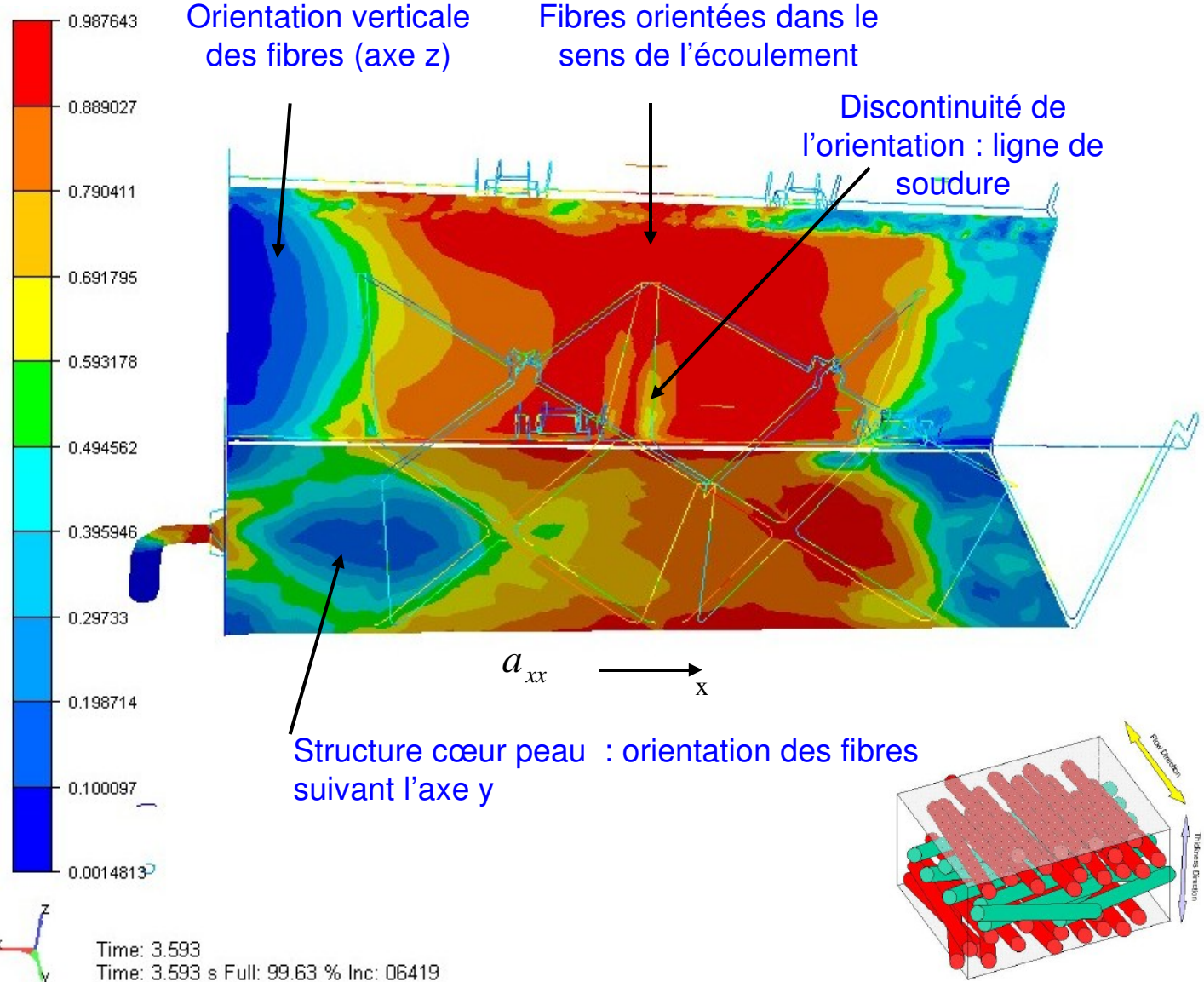
• Traverse : Géométrie

• **Traverse : Résultats**

• Traverse : Corrélations

La traverse nervurée

Orientation des fibres – structure cœur - peau



Modèles retenus

Méthode numérique

Résultats orientation

Résultats industriels

• Seuil : Géométrie et CI

• Seuil : Résultats Num.

• Seuil : Corrélations

• Traverse : Géométrie

• **Traverse : Résultats**

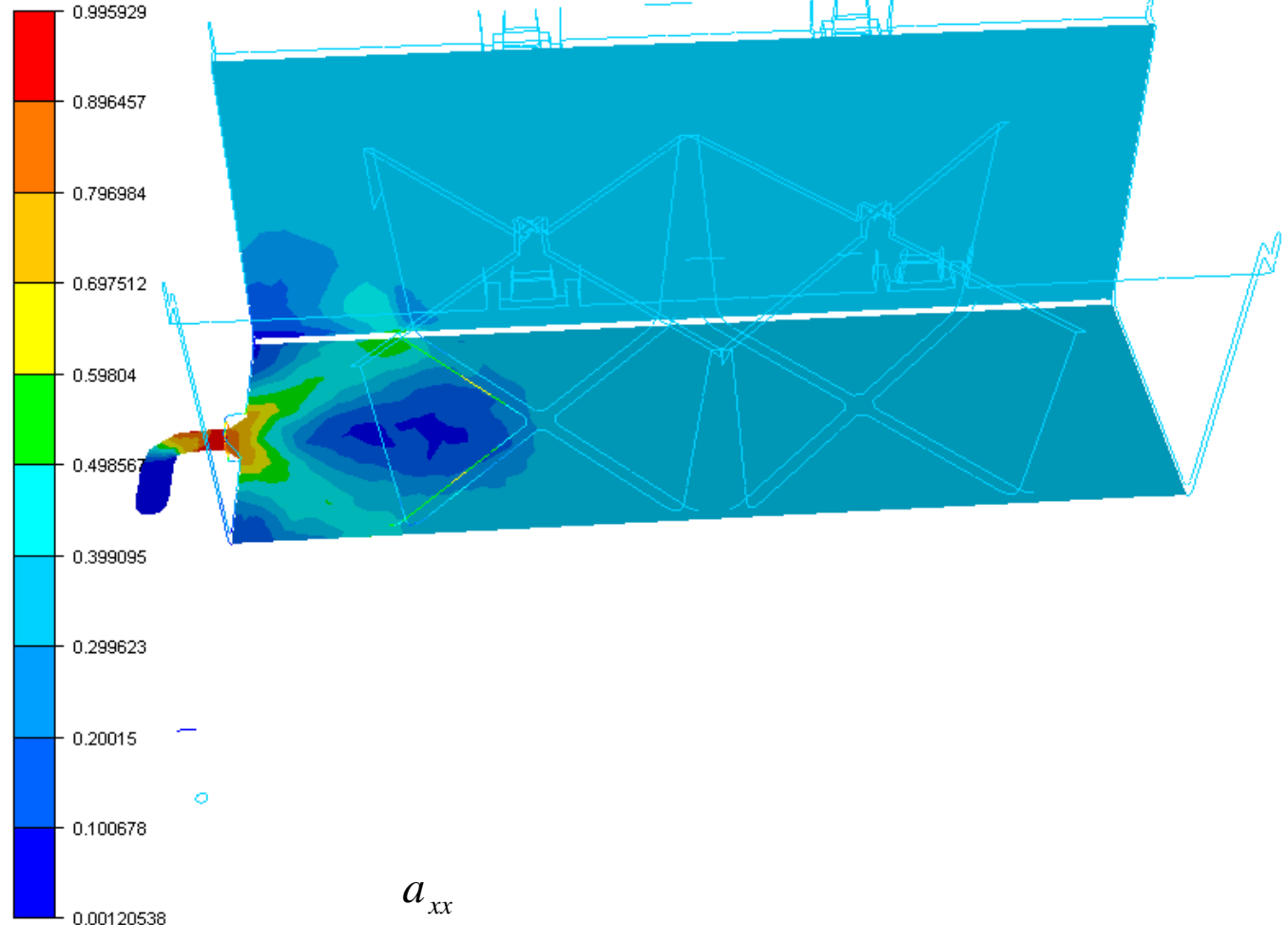
• Traverse : Corrélations

La traverse nervurée

Orientation des fibres – structure cœur - peau

View 1
Case 1 [reffilling_06419.in3]

Frin [22]



Frame: 1/152
Time: 0.274
Time: 0.274 s Full: 12.95 % Inc: 03100

GLview Inova 2005-11-24
AT: REM3D-Recherche DATAFILE : DATA_Filling.mtc CUSTOMER : CEMEF
Frin: XX Fiber_Orientation_D [3D element]
Disp: Geometry Displacement

Modèles retenus

Méthode numérique

Résultats orientation

Résultats industriels

Seuil : Géométrie et CI

Seuil : Résultats Num.

Seuil : Corrélations

Traverse : Géométrie

Traverse : Résultats

Traverse : Corrélations

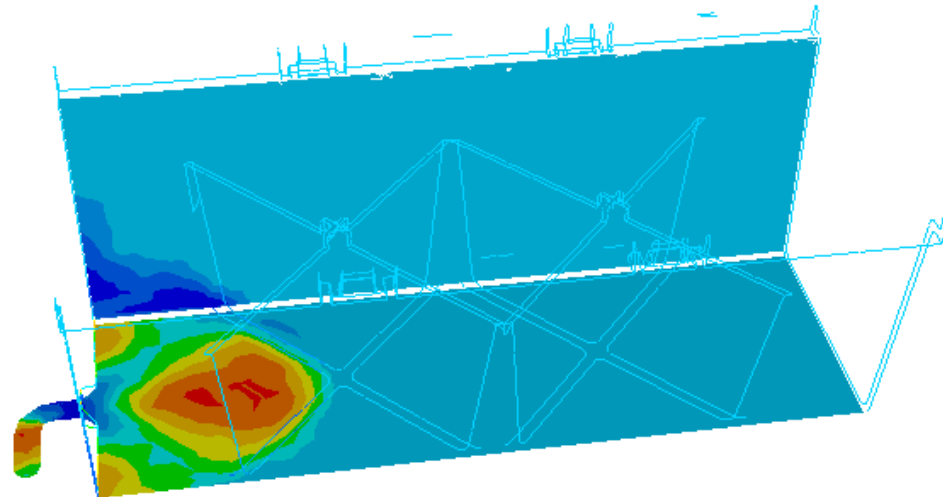
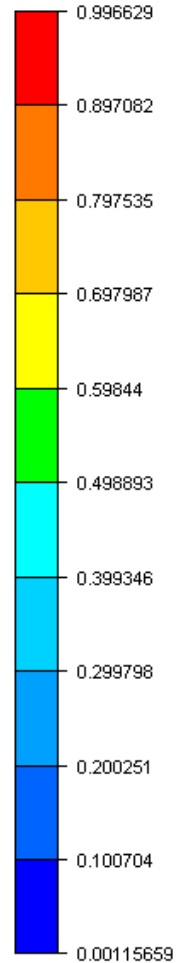
La traverse nervurée

Orientation des fibres – structure cœur - peau

View 1

Case 1 [refilling_06419.in3]

Frin [23]



a_{yy}

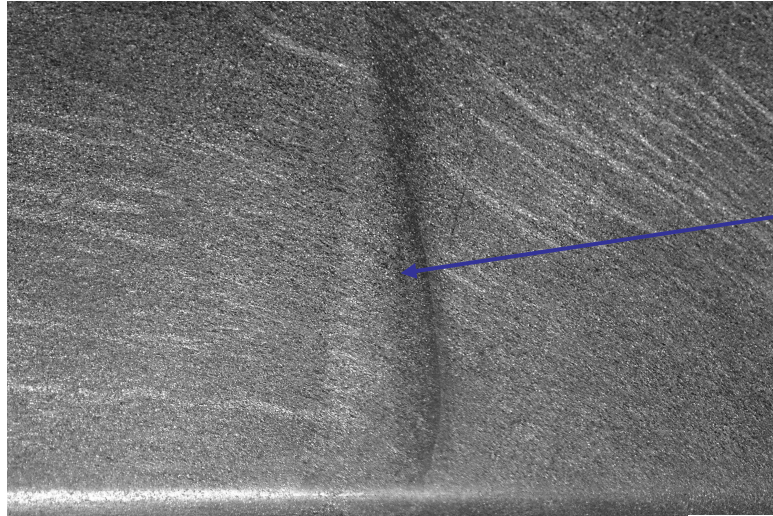


Frame: 1/152
Time: 0.274
Time: 0.274 s Full: 12.95 % Inc: 03100

GLview Inova 2005-11-24
AT: REM3D-Recherche DATAFILE : DATA_Filling.mtc CUSTOMER : CEMEF
Frin: YY Fiber_Orientation_0 [3D element]
Disp: Geometry Displacement

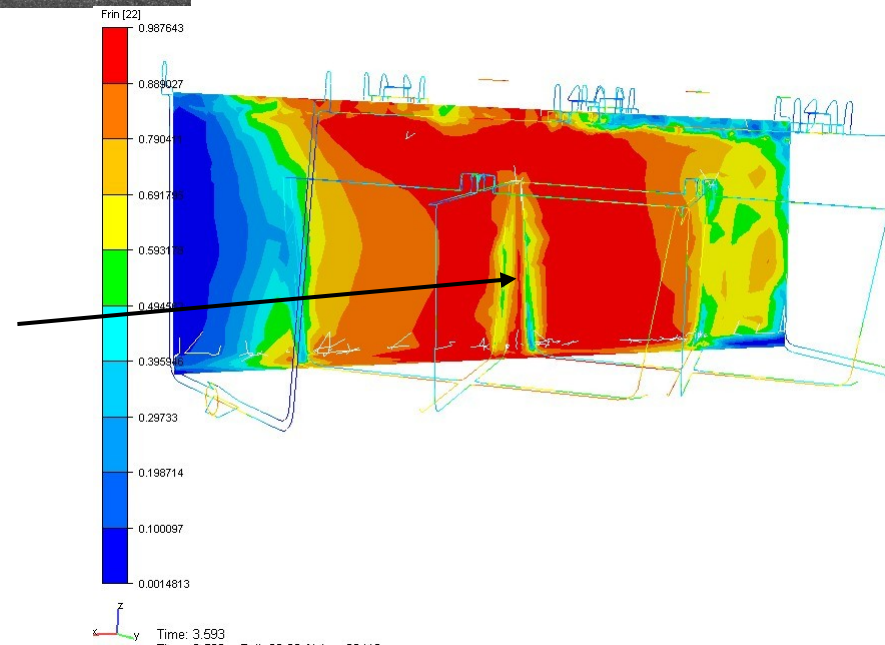
La traverse nervurée

Orientation des fibres – ligne de re-soudure



Photographie de la pièce après injection : ligne de soudure au milieu du flan de la pièce

Pièce simulée : présence d'une ligne d'intersection au milieu de la pièce, en paroi interne et à coeur



a_{xx}

➤ Modèles retenus

➤ Méthode numérique

➤ Résultats orientation

➤ Résultats industriels

• Seuil : Géométrie et CI

• Seuil : Résultats Num.

• Seuil : Corrélations

• Traverse : Géométrie

• **Traverse : Résultats**

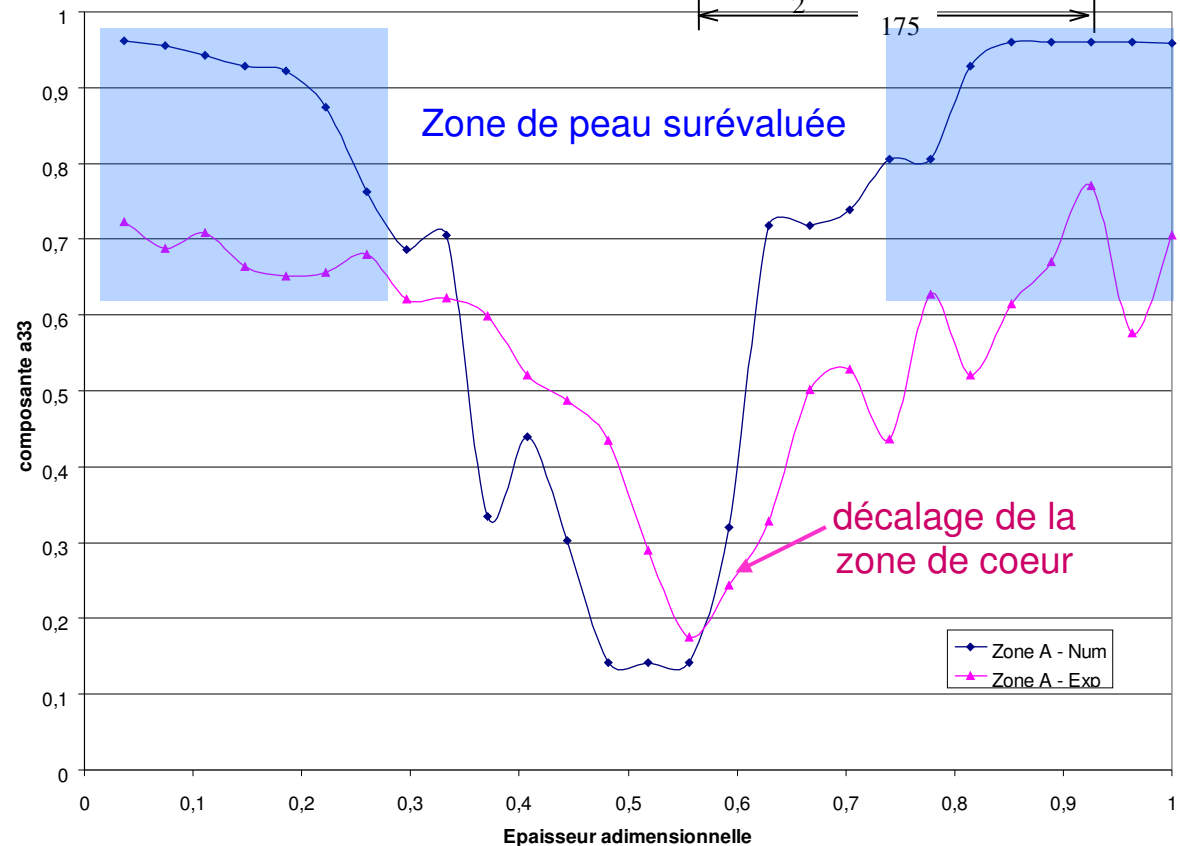
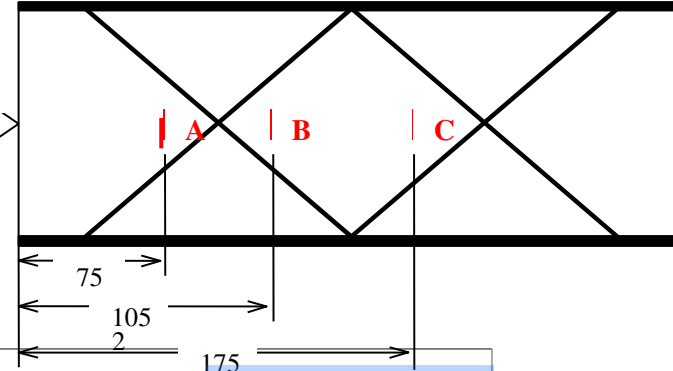
• Traverse : Corrélations

La traverse PO

❑ Corrélation code de calcul Rem3d – mesures expérimentales

Echantillon de mesure : zone A (axx)

Seuil d'injection en nappe



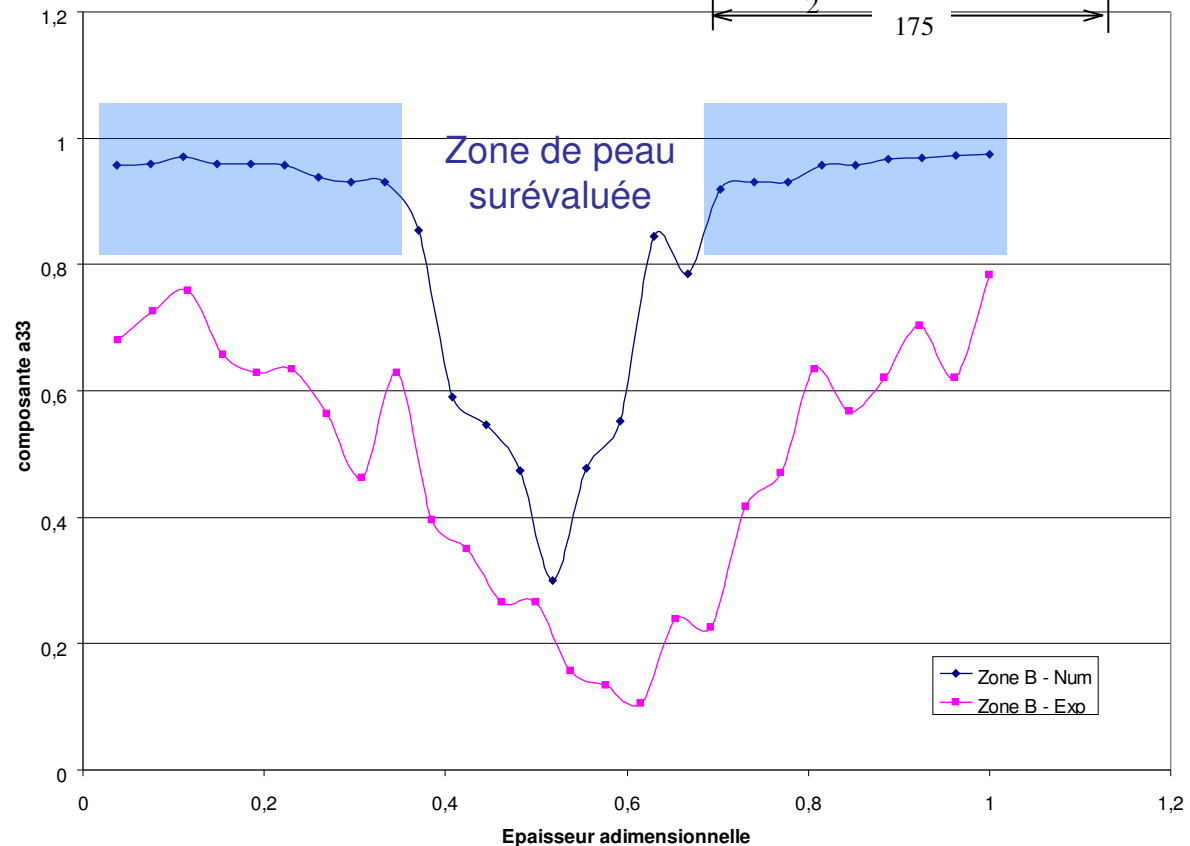
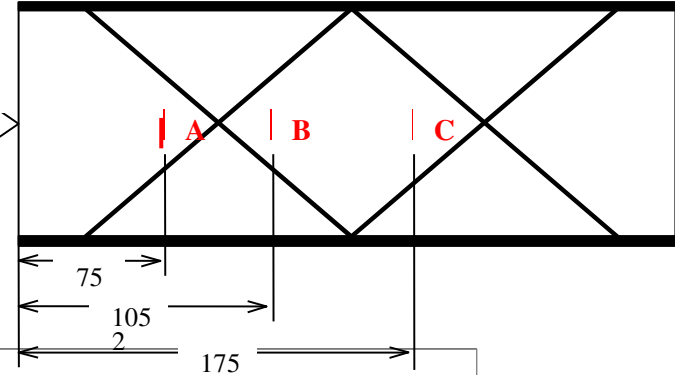
- Modèles retenus
- Méthode numérique
- Résultats orientation
- Résultats industriels
 - Seuil : Géométrie et CI
 - Seuil : Résultats Num.
 - Seuil : Corrélations
 - Traverse : Géométrie
 - Traverse : Résultats
 - Traverse : Corrélations

La traverse nervurée

❑ Corrélation code de calcul Rem3d – mesures expérimentales

Echantillon de mesure : zone B (axx)

Seuil d'injection en nappe

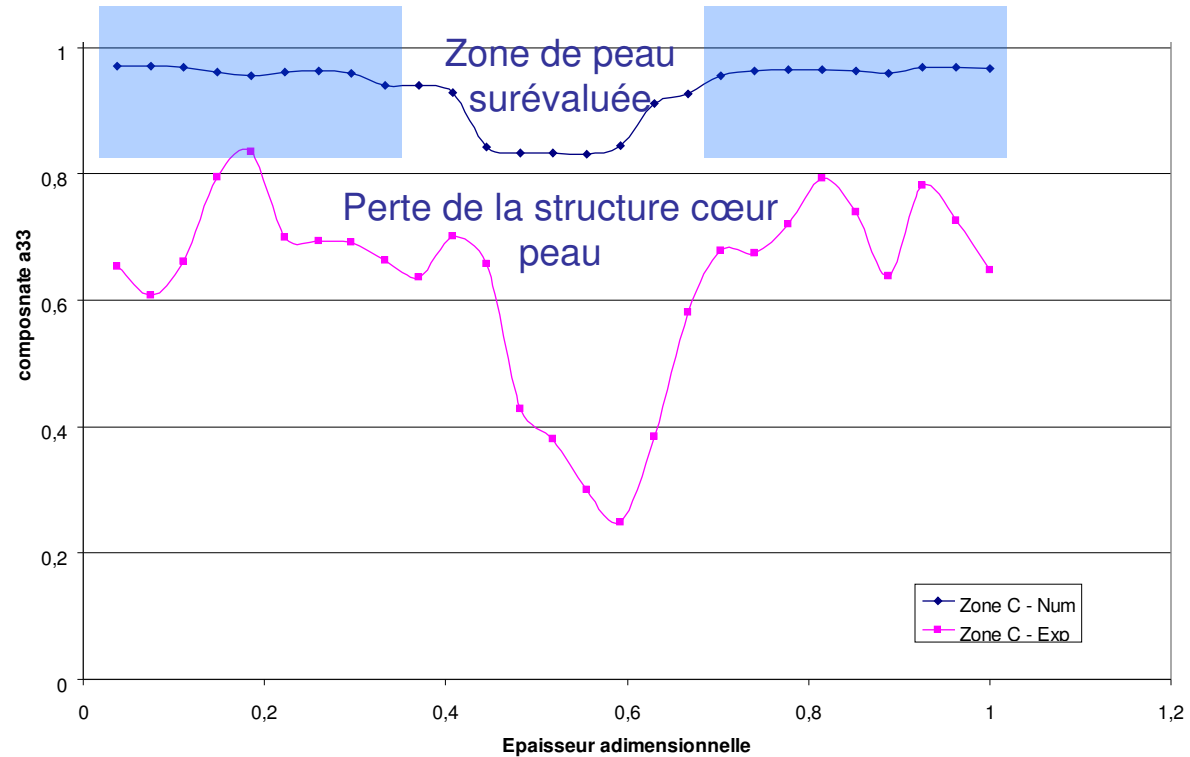
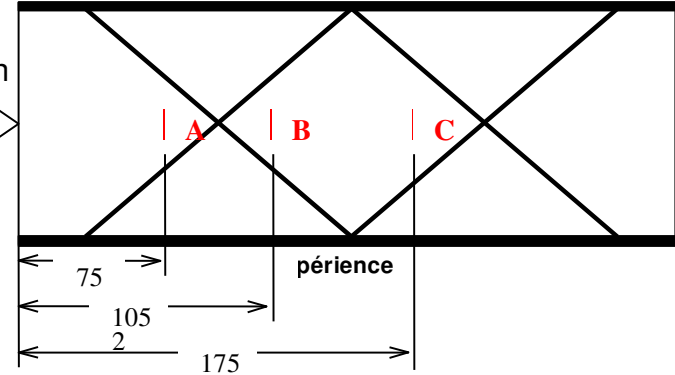


La traverse nervurée

❑ Corrélation code de calcul Rem3d – mesures expérimentales

Echantillon de mesure : zone C (axx)

Seuil d'injection en nappe
Seuil d'injection en nappe



- Modèles retenus
- Méthode numérique
- Résultats orientation
- Résultats industriels
- Seuil : Géométrie et CI
- Seuil : Résultats Num.
- Seuil : Corrélations
- Traverse : Géométrie
- Traverse : Résultats
- Traverse : Corrélations

Conclusion

- ❑ Intégration d'un module de prédiction de l'orientation de fibres
 - ✓ Implémentation dans Rem3D du modèle macroscopique de Folgar et Tucker
 - ✓ Implémentation de différentes équations de fermeture
 - ✓ Méthode de résolution TGD espace temps Pn en temps et P0 en espace
 - ✓ Validation numérique du code de calcul

- ❑ Intégration du couplage rhéologie/orientation
 - ✓ modèle macroscopique générique pour les suspensions chargées
 - ✓ traitement implicite de l'extra contrainte (implémenté)
 - ✓ Méthode éléments finis mixte P1+/P1

- ❑ Couplage rhéologie/orientation en extrusion et injection
 - ✓ implémentation d'un couplage faible (résolution de manière successive)
 - ✓ Calcul des équations dans tout le domaine (fluide et vide)
 - ✓ Environnement parallèle

Conclusion

❑ Mécanismes d'orientation : étude de sensibilité des paramètres

Le coefficient d'interaction

- ✓ en cisaillement : l'orientation en paroi est conditionnée par CI
- ✓ en élongation : CI a une influence sur l'orientation des fibres en paroi et à coeur

Le couplage rhéologie orientation :

- ✓ en cisaillement : analogie entre l'effet du couplage et l'effet rhéofluidifiant
- ✓ en élongation : l'effet du couplage est plus important
- ✓ en injection : modifie la dynamique de remplissage

L'orientation initiale des fibres :

- ✓ rôle important dans les zones où les fibres sont transportées

❑ Corrélation code de calcul / observations expérimentales

La plaque seuil

- ✓ la zone de cœur est délimitée à une région spécifique
- ✓ le couplage est important dans le seuil d'injection (effet 3D, élongation)
- ✓ le couplage est négligeable lorsque le cisaillement est majoritaire

La traverse nervurée

- ✓ Calcul 3D pour une géométrie à paroi mince nervurée
- ✓ Bonne prédiction de la position d'une ligne de soudure
- ✓ Corrélation : bonne concordance des résultats (qualitatif)

Perspectives

□ D'un point de vue numérique

- ✓ Utilisation de maillages plus fins via la parallélisation du solveur en vitesse (Cluster)
- ✓ Résolution de l'orientation des fibres : interpolation P1 en espace
- ✓ Mettre en place des utilitaires nécessaires à l'analyse des données 3D
- ✓ Thermique anisotrope
- ✓ Prise en compte d'un modèle bi phasique : une phase fibre évoluant indépendamment dans une phase fluide (régimes concentrés ?)
- ✓ Résolution directe de l'équation de Fokker Planck (réduction de modèle)

□ D'un point de vue Application

- ✓ Travaux sur la traverse nervurée en ajustant les paramètres + couplage
- ✓ étudier l'influence du couplage sur la forme de la zone de coeur

□ D'un point de vue modélisation

- ✓ introduire un coefficient d'interaction anisotrope
- ✓ enrichir le modèle d'orientation pour prendre en compte des régimes concentrés
- ✓ enrichir la loi de comportement rhéologique

Simulation Numérique de l'orientation de fibres en injection de thermoplastique renforcé

Abla Redjeb

Sous la direction de :

Patrice Laure, Michel Vincent, Thierry Coupez



Cécile Venet



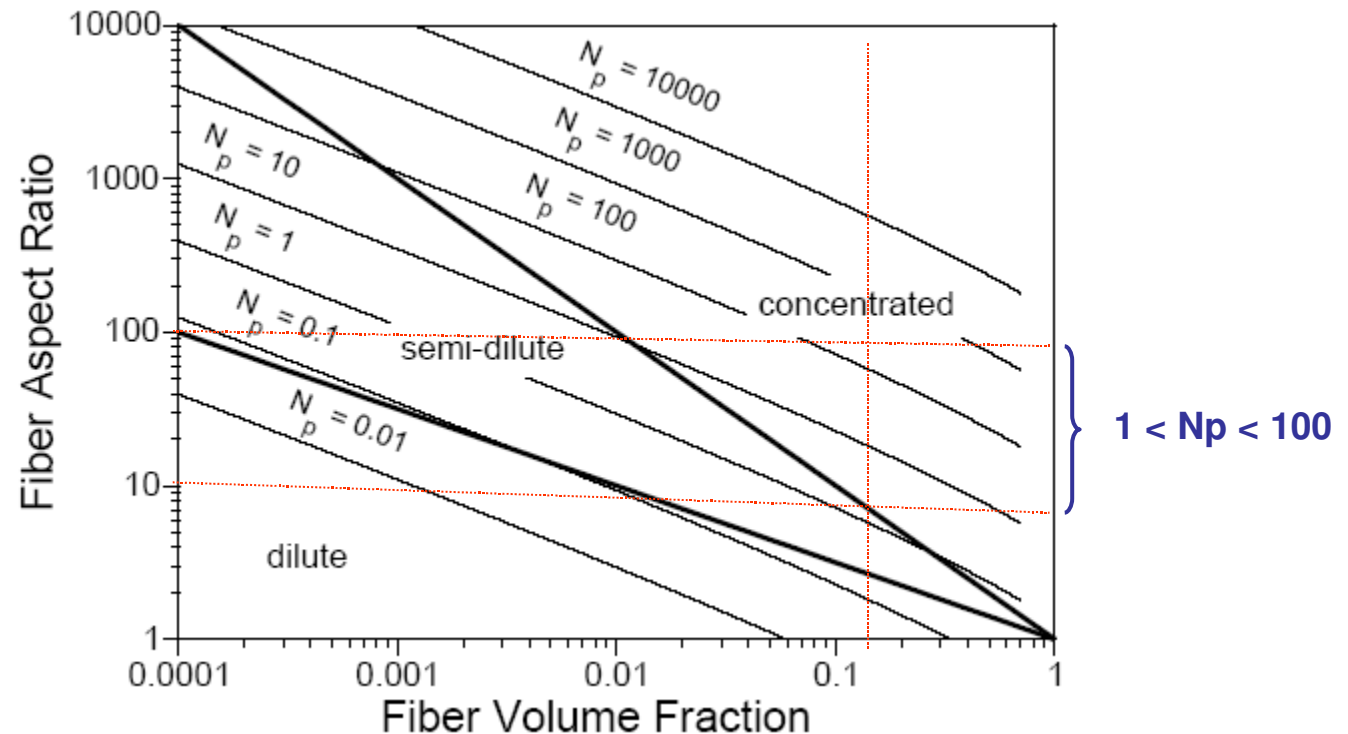
Philippe Le Bot



Jocelyn Mauffrey

❖ Loi de comportement : le paramètre rhéologique N_p

$$\underline{\underline{\sigma}} = -p \underline{\underline{I_d}} + 2\eta \underline{\underline{\varepsilon}}(v) + 2\eta N_p (\underline{\underline{\varepsilon}}(v) : \underline{\underline{a}}_2) \underline{\underline{a}}_2$$



Théorie de Dinh et Armstrong

$$N_p = \frac{\phi \beta^2}{3 \ln(h/R)}$$

• taille de la cellule = distance h entre 2 fibres