



Simulation numérique des écoulements aux échelles microscopique et mésoscopique dans le procédé RTM

Grégory PUAUX

le 8 décembre 2011

Patrice LAURE – Directeur de thèse

Michel VINCENT – Directeur de thèse

Luisa SILVA – Maître de thèse

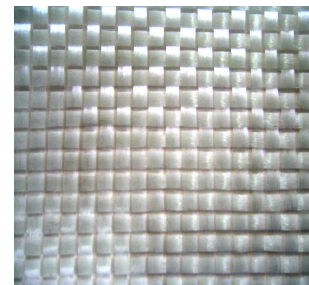
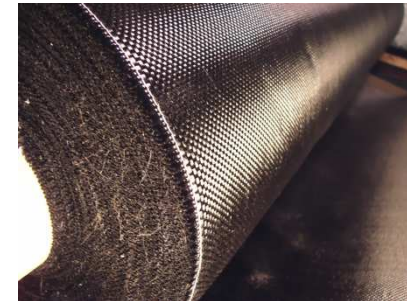
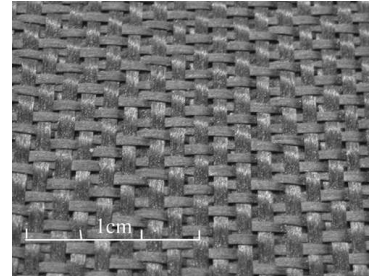
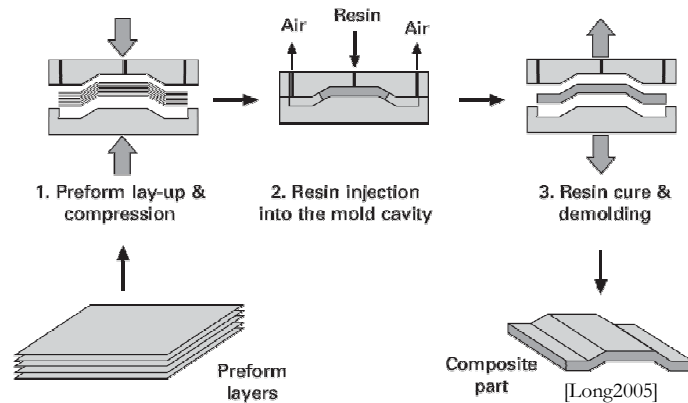


Introduction

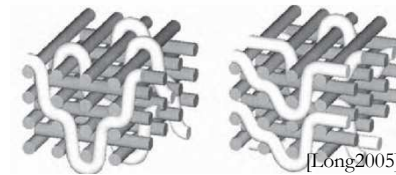
- Financement : Agence Nationale de la Recherche
- Projet : LCM3M (Liquid Composite Molding, Micro-Meso-Macro)
- Compréhension des couplages hydro-mécaniques et thermo-physico-chimiques
- Modèle numérique multi-physique et multi-échelles
- Partenaires industriels :
EADS France Innovation Works, SNECMA, ROXEL,
HEXCEL, TENSYL
- Partenaires académiques :
ONERA, PRISME, LAMCOS, LOMC, CEMEF

Les Procédés LCM

- Fonctionnement du procédé



[Song2006]



[Long2005]

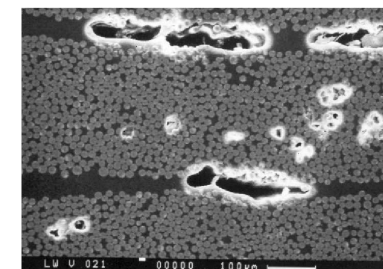
- L'apparition de porosités

- Porosités

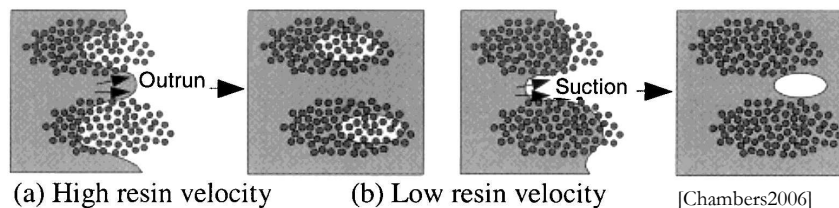
- Entre les mèches (méso-porosités)
 - Dans les mèches (micro-porosités)
 - Conséquence du régime d'écoulement et de chemins préférentiels



[Hamidi2005]



[Frishfelds2003]



Objectifs de la thèse

- Calculs numériques de perméabilité
 - Milieux saturés
 - Échelle microscopique
 - Échelle mésoscopique
- Simulation des phénomènes capillaires
 - Tension de surface diphasique
 - Mouillabilité (3 phases)
- Contexte numérique
 - Cimlib / Parallèle
 - Éléments finis
 - Immersion de domaine / Level-set
 - Remaillage topologique

- Modélisation des écoulements saturés
 - Les différentes échelles d'écoulements
 - Méthodes numériques
- Calcul de la perméabilité
 - Lois analytiques
 - Calcul numérique
- Modélisation des écoulements non saturés
 - Tension de surface
 - Méthodes numériques
- Conclusion et perspectives

Les différentes échelles d'écoulements

- Microscopique

- Échelle des fibres
- Fibres imperméables
- Écoulement de Stokes

$$\begin{cases} 2\eta \nabla \cdot \epsilon(\vec{v}) - \nabla p = 0 \\ \nabla \cdot \vec{v} = 0 \end{cases}$$

- Mésoscopique

- Échelle des mèches
- Écoulement de Stokes entre les mèches
- Écoulement de Darcy/Brinkman dans les mèches

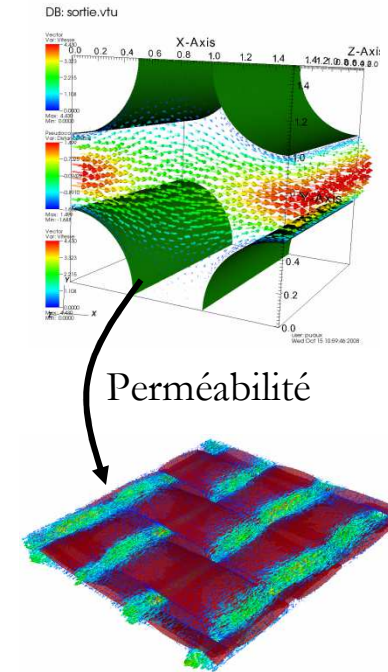
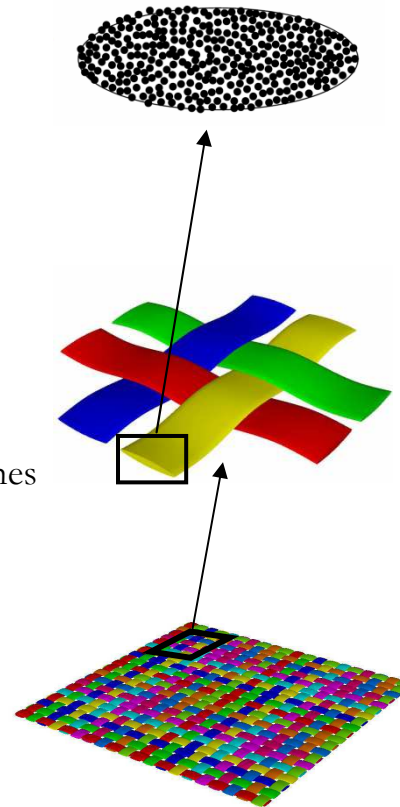
$$\vec{v}_D = -\frac{K}{\eta} \nabla p$$

- Macroscopique

- Échelle de la pièce
- Écoulement de Darcy

- Homogénéisation par prise de moyenne

- Application des moyennes sur un VER
- Solide non déformable et statique
- Fluide incompressible



$$-\Phi \nabla \langle p \rangle^f + \eta \Delta \langle \vec{v} \rangle - \frac{\Phi \eta}{K} \langle \vec{v} \rangle = 0 \quad \text{équation de Brinkman}$$

$$\langle \vec{v} \rangle = -\frac{1}{\eta} K \cdot \nabla \langle p \rangle^f \quad \text{équation de Darcy}$$

La Méthode d'Immersion de Domaines

- Fonction level-set

$$\alpha(\vec{x}) = \pm d(\vec{x}, \Gamma) \quad \Gamma_h = \{\vec{x}, \alpha(x) = 0\}$$

- Interface diffuse

$$\eta(\alpha) = \eta_f \mathbb{I}_f + \eta_s (1 - \mathbb{I}_f)$$

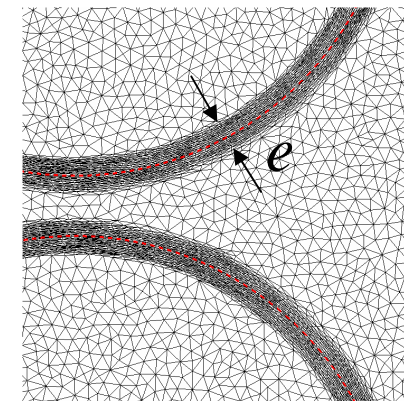
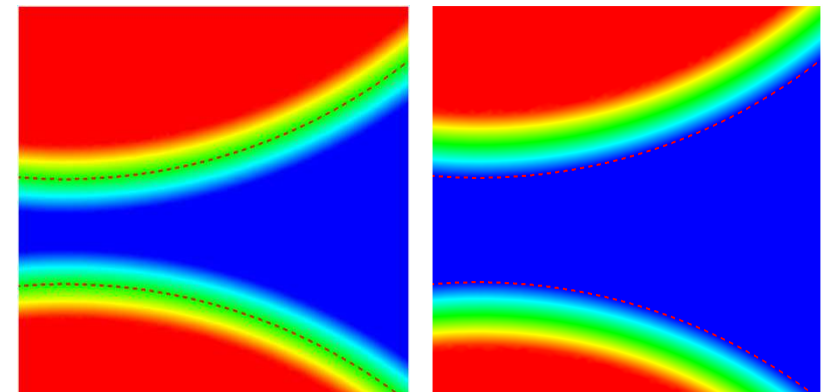
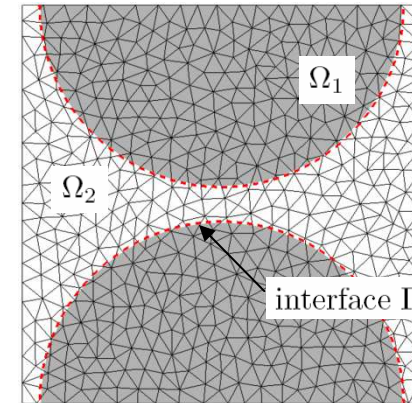
$$\mathbb{I}_f = \begin{cases} 1 & \text{si } \alpha > e \\ \frac{\alpha}{e} & \text{si } \|\alpha\| < e \text{ ou } 0 < \alpha < e \\ 0 & \text{si } \alpha < -e \end{cases} \quad \alpha > e$$

- Solide= Méthode type pénalisation
- Adaptation de maillage anisotrope

$$\mathcal{M} = \begin{cases} \varepsilon^2 \mathbb{I} & \text{si } |\alpha| > e \\ (\varrho^2 - \varepsilon^2) \frac{\nabla \alpha \otimes^T \nabla \alpha}{|\nabla \alpha|^2} + \varepsilon^2 \mathbb{I} & \text{si } |\alpha| < e \end{cases}$$

[Zerguine2007]

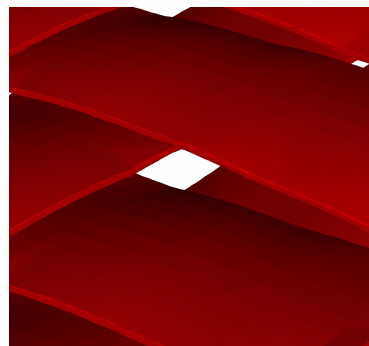
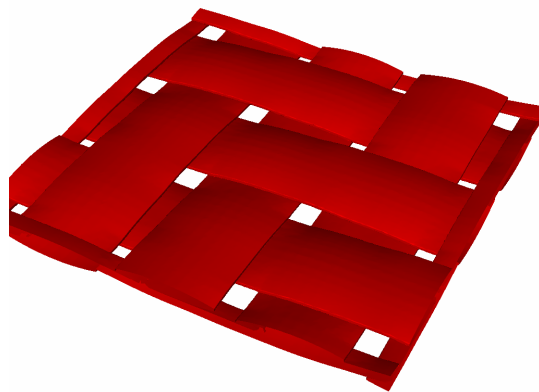
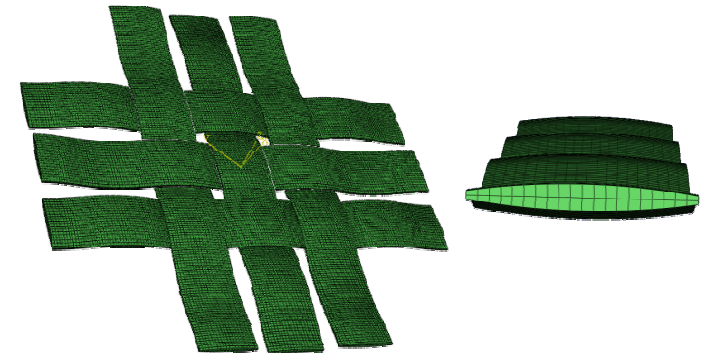
$$\varepsilon = \frac{1}{h_\varepsilon} \quad \varrho = \frac{1}{h_\varrho}$$



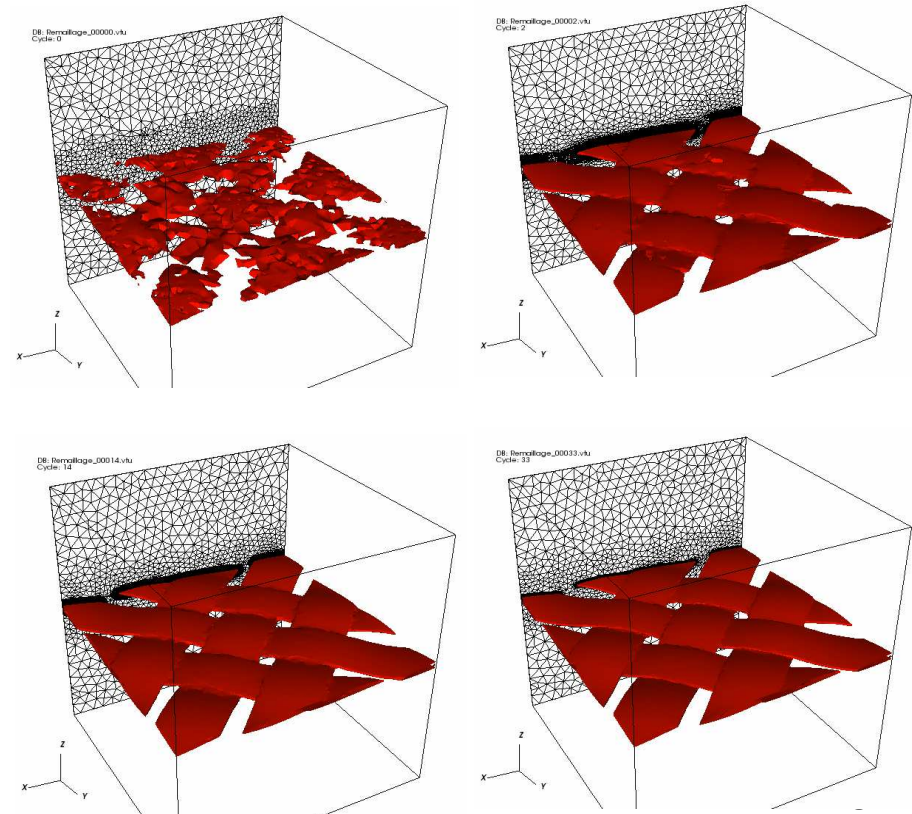
La Méthode d'Immersion de Domaines

- Immersion de maillage
 - Maillage de la frontière de l'objet à immerger
 - Calcul de la distance aux éléments frontière du maillage immergé
 - Optimisation par un arbre hiérarchique (découpage en boîtes)

- Exemple sur un taffetas et sur un sergé G986



3h – 16 processeurs
230 000 noeuds

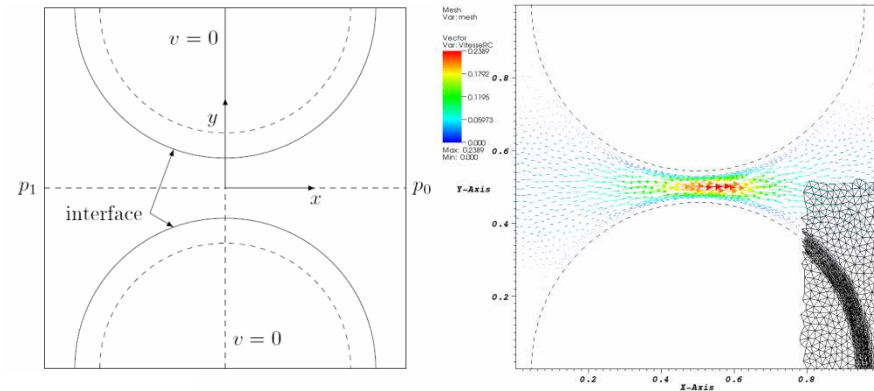
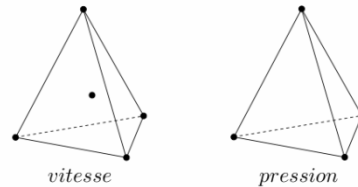


La Résolution des Équations de Stokes

Formulation forte

$$\begin{cases} 2\eta \nabla \cdot \epsilon(\vec{v}) - \nabla p = 0 \\ \nabla \cdot \vec{v} = 0 \end{cases}$$

$$\epsilon(\vec{v}) = \frac{1}{2} (\nabla \vec{v} + {}^T \nabla \vec{v})$$



Formulation faible stabilisée

$$\tilde{v}_h = \vec{v}_h + \vec{v}_h^b$$

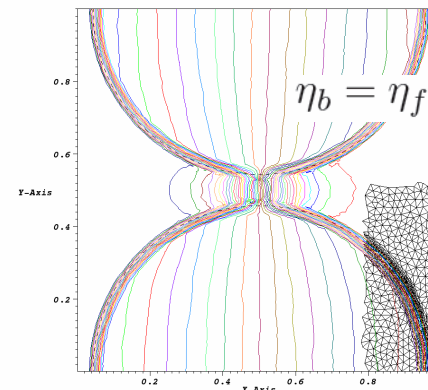
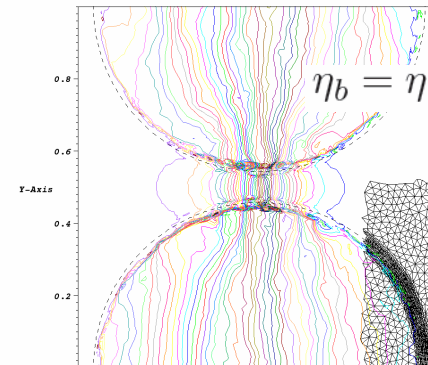
$$\tilde{w}_h = \vec{w}_h + \vec{w}_h^b$$

$$\begin{cases} \int_{\Omega} 2\eta \epsilon(\vec{v}_h) : \epsilon(\vec{w}_h) d\Omega - \int_{\Omega} p_h \nabla \cdot \vec{w}_h d\Omega = 0 \\ \int_{\Omega} 2\eta_b \epsilon(\vec{v}_h^b) : \epsilon(\vec{w}_h^b) d\Omega - \int_{\Omega} p_h \nabla \cdot \vec{w}_h^b d\Omega = 0 \\ - \int_{\Omega} q_h \nabla \cdot \vec{v}_h d\Omega - \int_{\Omega} q_h \nabla \cdot \vec{v}_h^b d\Omega = 0 \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} A_{vv} & 0 & A_{vp}^T \\ 0 & A_{bb} & A_{bp}^T \\ A_{vp} & A_{bp} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{v}_h \\ \vec{v}_h^b \\ p_h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} A_{vv} & A_{vp}^T \\ A_{vp} & C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_h \\ p_h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$C = -A_{bp} A_{bb}^{-1} A_{bp}^T$$



Résolution des Équations de Brinkman

Formulation forte

$$\eta' \Delta \vec{v} - \frac{\eta}{K} \vec{v} - \nabla p = 0$$

Formulation faible stabilisée

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_{\Omega} \left[\frac{\eta}{K} \vec{v}_h \vec{w}_h + 2 \frac{\eta}{\Phi} \epsilon(\vec{v}_h) : \epsilon(\vec{w}_h) \right] d\Omega - \int_{\Omega} \frac{\eta}{K} \vec{v}_h^b \vec{w}_h d\Omega - \int_{\Omega} p_h \nabla \cdot \vec{w}_h d\Omega = 0 \\ \int_{\Omega} \frac{\eta}{K} \vec{v}_h \vec{w}_h^b d\Omega + \int_{\Omega} \left[\frac{\eta}{K} \vec{v}_h^b \vec{w}_h^b + 2 \frac{\eta}{\Phi} \epsilon(\vec{v}_h^b) : \epsilon(\vec{w}_h^b) \right] d\Omega - \int_{\Omega} p_h \nabla \cdot \vec{w}_h^b d\Omega = 0 \\ - \int_{\Omega} q_h \nabla \cdot \vec{v}_h d\Omega - \int_{\Omega} q_h \nabla \cdot \vec{v}_h^b d\Omega = 0 \end{array} \right.$$

$$\begin{pmatrix} A_{vv} & A_{vb}^T & A_{vp}^T \\ A_{vb} & A_{bb} & A_{bp}^T \\ A_{vp} & A_{bp} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{v}_h \\ \vec{v}_h^b \\ p_h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

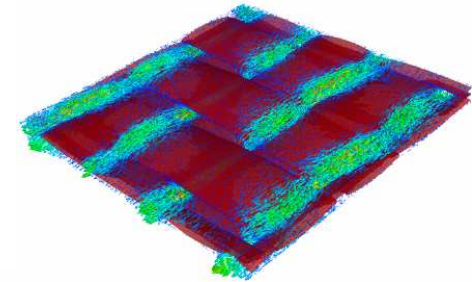
En pratique, on limite la valeur de K dans la bulle

$$\begin{pmatrix} \tilde{A}_{vv} & \tilde{A}_{vp}^T \\ \tilde{A}_{vp} & C \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{v}_h \\ p_h \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$C = -A_{bp} A_{bb}^{-1} A_{bp}^T$$

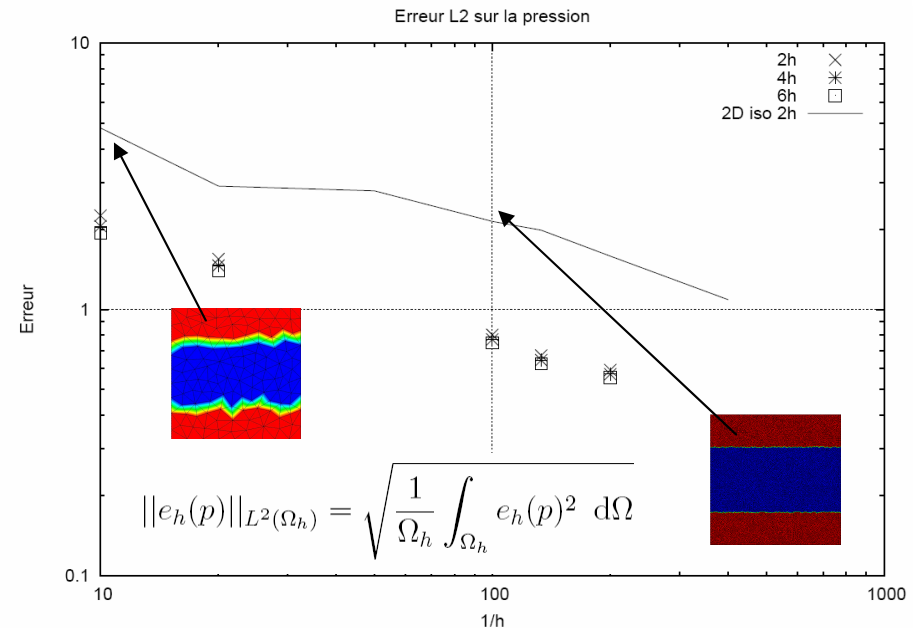
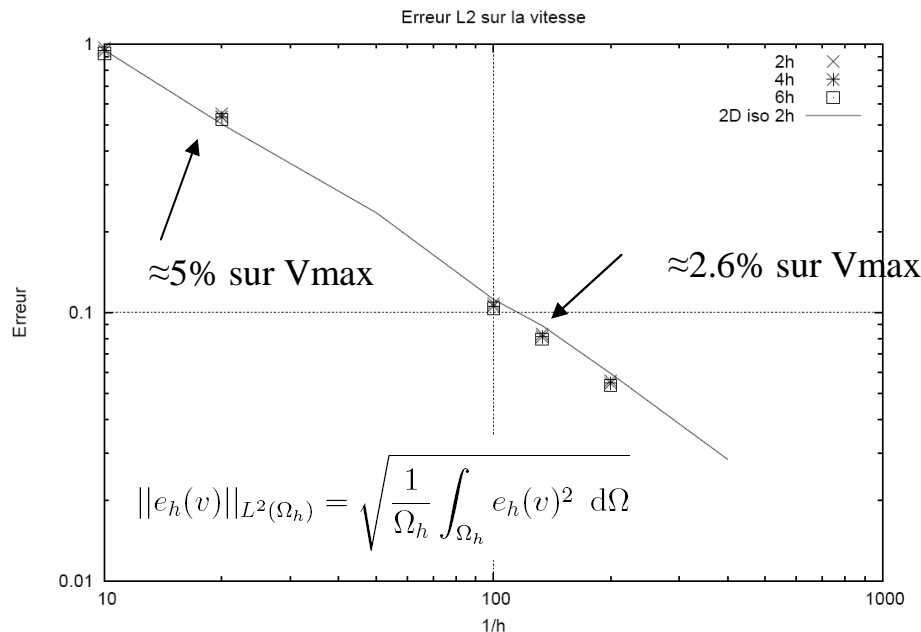
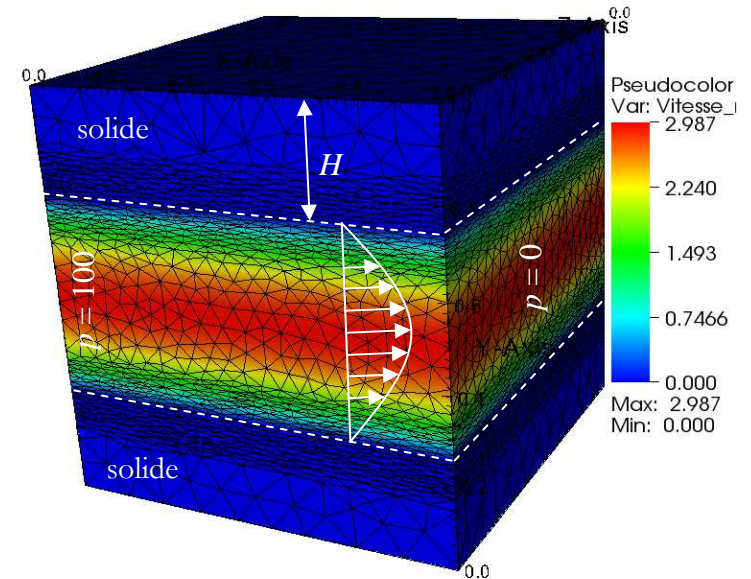
$$\tilde{A}_{vv} = A_{vv} - A_{vb}^T A_{bb}^{-1} A_{vb}$$

$$\tilde{A}_{vp} = A_{vp} - A_{bp} A_{bb}^{-1} A_{vb}$$

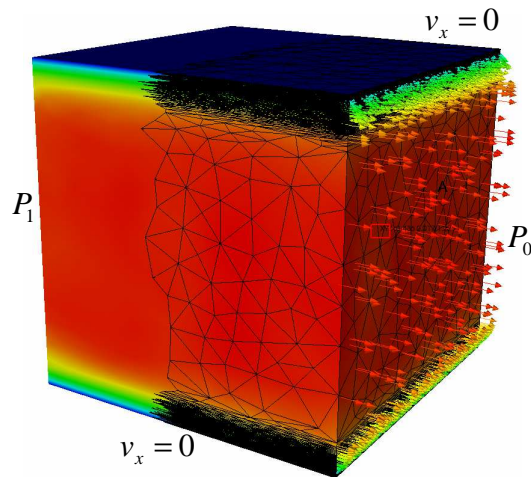


Validation du solveur de Stokes

- Écoulement de Poiseuille plan
 - Solution analytique : $v_x(y) = \frac{\Delta p}{2\eta L} (y^2 - H^2)$
 - Mélange de viscosité dans la zone solide
- Conclusion de l'étude
 - Peu sensible à l'épaisseur de la zone de mélange
 - Peu sensible au type de maillage

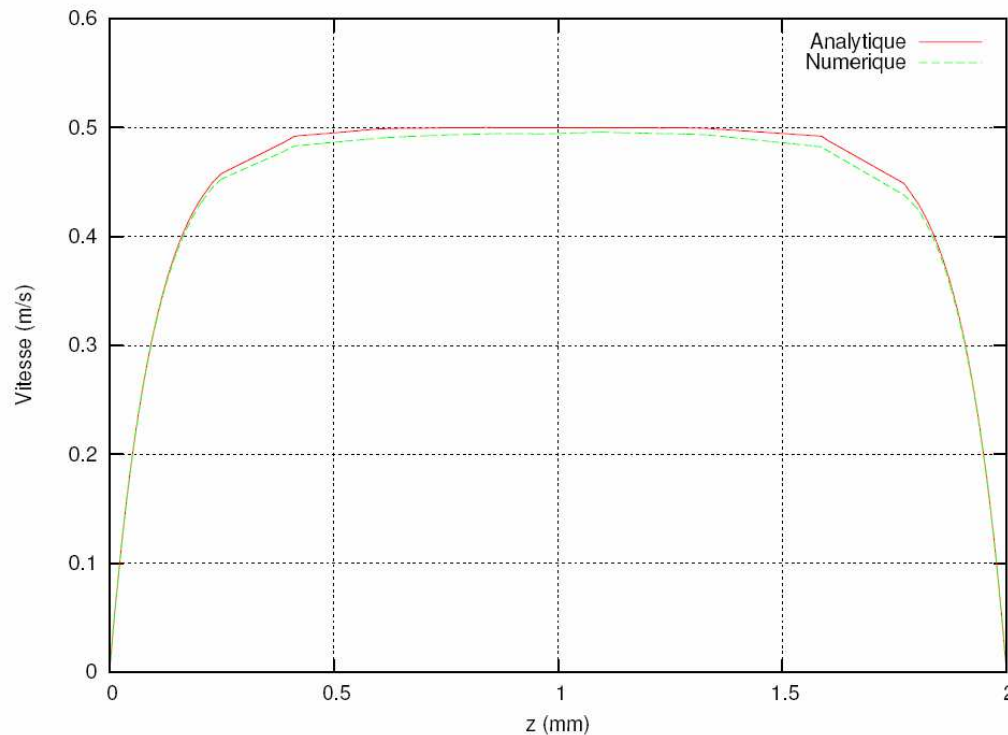


Validation du solveur de Brinkman



Solution de l'équation de Brinkman :

$$v_x(z) = -K \frac{\Delta p}{L} \left(1 - \frac{\cosh\left(\frac{H-z}{\sqrt{K}}\right)}{\cosh\left(\frac{H}{\sqrt{K}}\right)} \right)$$



Dimensions 2 mm

Viscosité 1 Pa.s

Pression 1bar

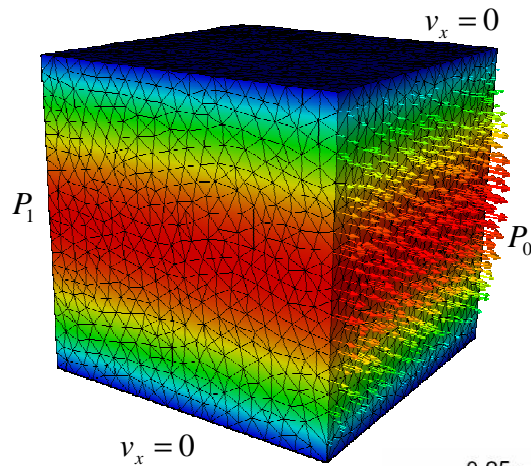
Perméabilité 10^{-8} m^2

$h=0.002$ près des frontières

$h=0.2$ au centre

Erreur relative en vitesse : $\approx 5\%$

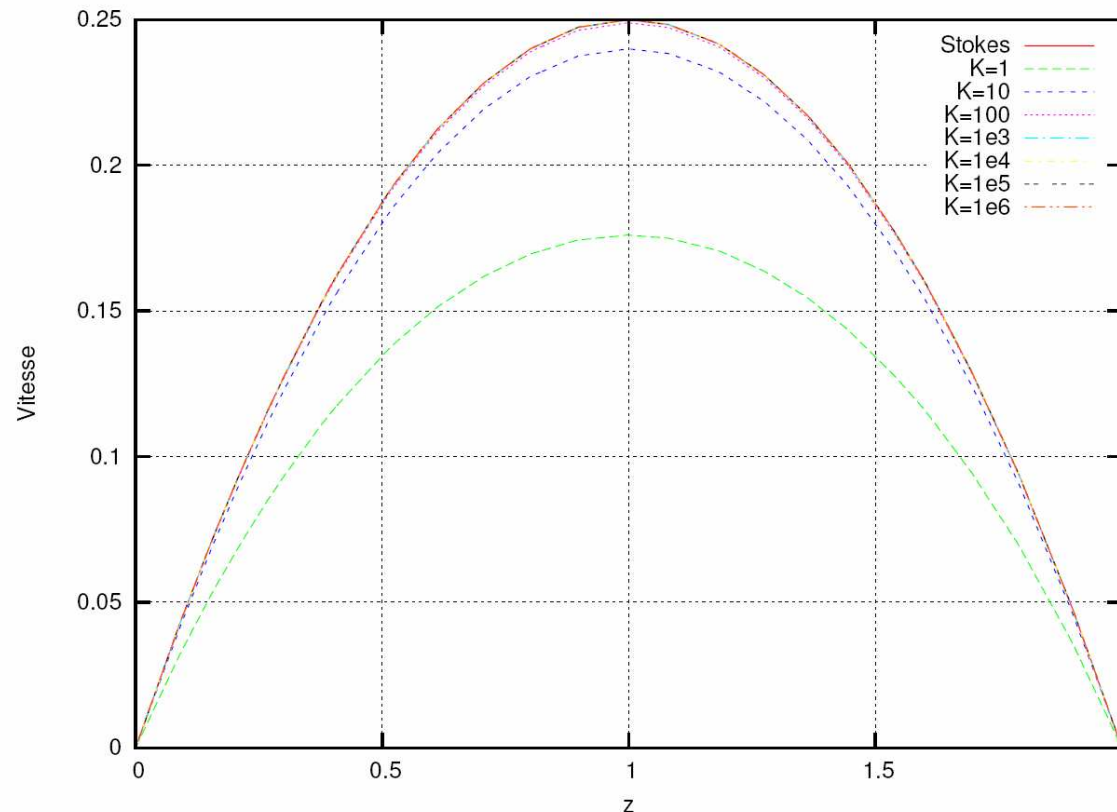
Validation du solveur de Brinkman



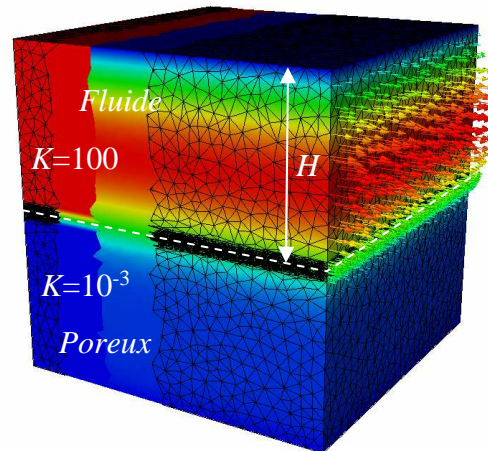
Peut-on retrouver une solution de Stokes ?

$$\eta' \Delta \vec{v} - \frac{\eta}{K} \vec{v} - \nabla p = 0$$

Si K augmente, on tend vers une équation de Stokes



Validation du solveur de Brinkman



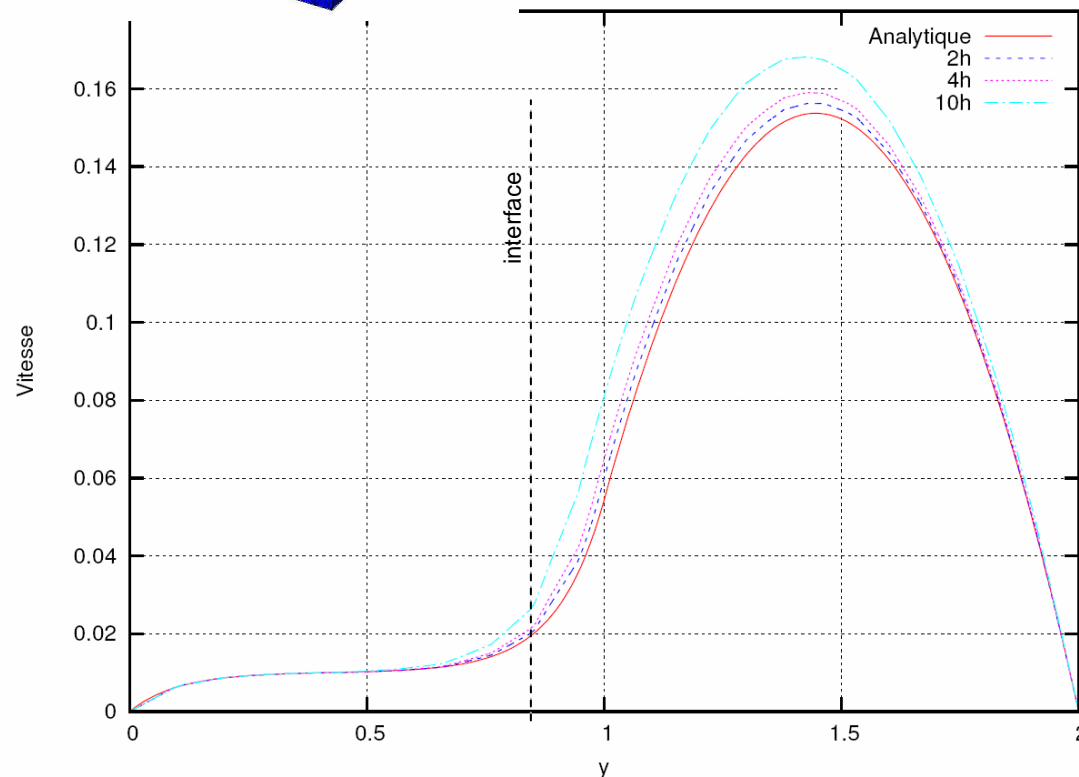
Solution du couplage

Près de l'interface : $h = 0.005$

Taille de maille globale : $h = 0.1$

$\Delta p = 2$ $K_{Stokes} = 100$ $H = 2$

$\eta = 1$ $K = 10^{-3}$



Grande sensibilité à l'épaisseur de mélange de la perméabilité

Étude plus poussée nécessaire

- Modélisation des écoulements saturés
 - Les différentes échelles d'écoulements
 - Méthodes numériques
- Calcul de la perméabilité
 - Lois analytiques
 - Calcul numérique
- Modélisation des écoulements non saturés
 - Tension de surface
 - Méthodes numériques
- Conclusion et perspectives

Lois Analytiques

- Modèle capillaire

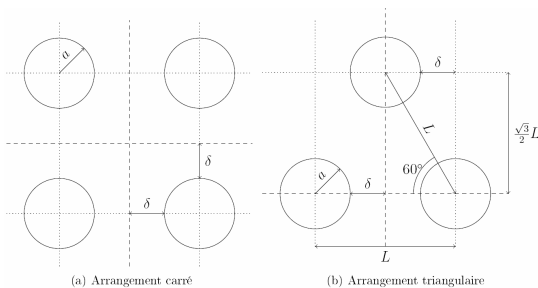
- Kozeny-Carman [Carman1961] $K = \frac{1}{k_0 \tau^2 S_0^2} \frac{\Phi^3}{(1 - \Phi)^2}$ τ tortuosité k_0 facteur de forme
 Φ porosité S_0 surface spécifique

- Modèle de cellule

- Happel [Happel1959] $K_{\perp} = \frac{1}{8V_f} \left(\frac{V_f^2 - 1}{V_f^2 + 1} - \ln V_f \right)$ $K_{\parallel} = \frac{1}{4V_f} \left(2V_f - \frac{1}{2}V_f^2 - \frac{3}{2} - \ln V_f \right)$

- Modèle de lubrification

- Gebart [Gebart1992]



$$K_{carré} = \frac{16}{9\sqrt{2}\pi} \left(\sqrt{\frac{V_{fmax}}{V_f}} - 1 \right)^{5/2}$$

$$K_{tri} = \frac{16}{9\sqrt{6}\pi} \left(\sqrt{\frac{V_{fmax}}{V_f}} - 1 \right)^{5/2}$$

$$V_{fmax} = \frac{\pi}{4}$$

$$V_{fmax} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}}$$

- Modèle mixte [Bruschke1993]

$$K_{hyb} = \xi_1 K_{lub} + \xi_2 K_{cell}$$

Méthodes numériques développées

- Calcul numérique de la perméabilité

$$K = -\eta \frac{\langle v \rangle}{\langle \nabla p \rangle^f}$$

$$K = -\eta \frac{\int_{\Omega_f} v \, d\Omega_f}{\int_{\Omega_f} \nabla p \, d\Omega_f}$$

$$K = -\eta \Phi \frac{\sum_i \int_{\Omega_i} (1 - I_s) v \, d\Omega_i}{\sum_i \int_{\Omega_i} (1 - I_s) \nabla p \, d\Omega_i}$$

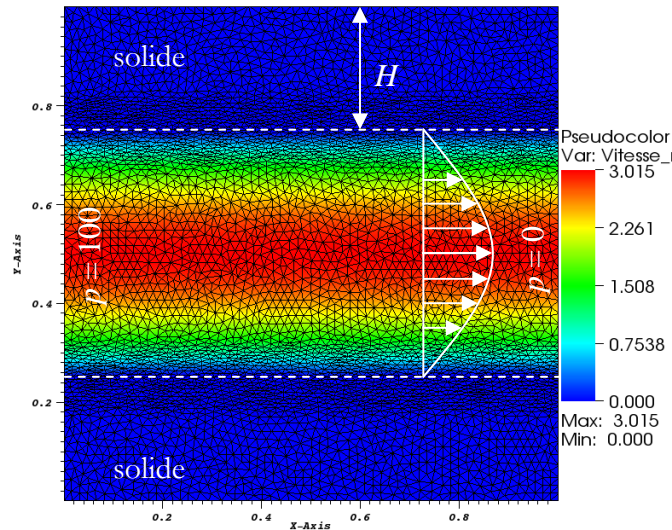
- Lissage du champ de pression

$$p_s + \boxed{\varepsilon_{\mathcal{K}} \Delta p_s} \leftarrow p \quad \text{terme diffusif dépendant de la taille de maille}$$

$$\int_{\Omega} p_s q_h \, d\Omega - \int_{\Omega} \varepsilon_{\mathcal{K}} \nabla p_s \nabla q_h \, d\Omega = \int_{\Omega} p q_h \, d\Omega$$

Validation

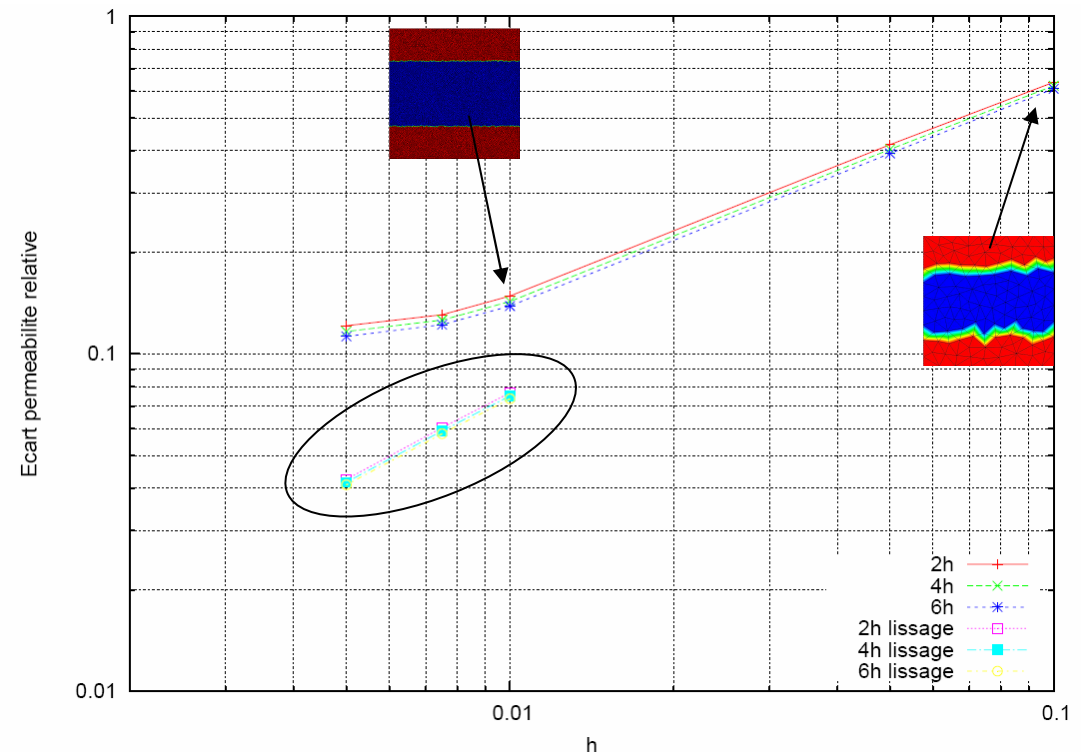
- Perméabilité équivalente à un écoulement de Poiseuille



- Poiseuille = vitesse analytique
- Perméabilité avec Darcy

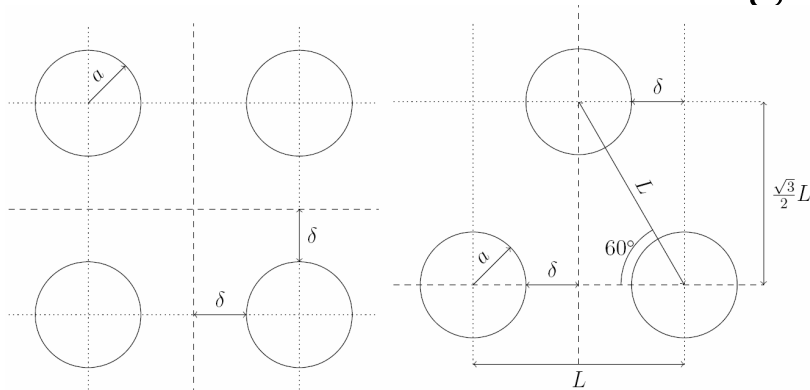
$$v_x(y) = \frac{\Delta p}{2\eta L} (y^2 - H^2) \quad K = \frac{QL\eta}{\Delta p S} \quad K = \frac{H^2}{6}$$

- Peu d'influence de l'épaisseur de mélange (dans le solide seulement)
- Plus précis avec le lissage de la pression



Comparaison avec la littérature

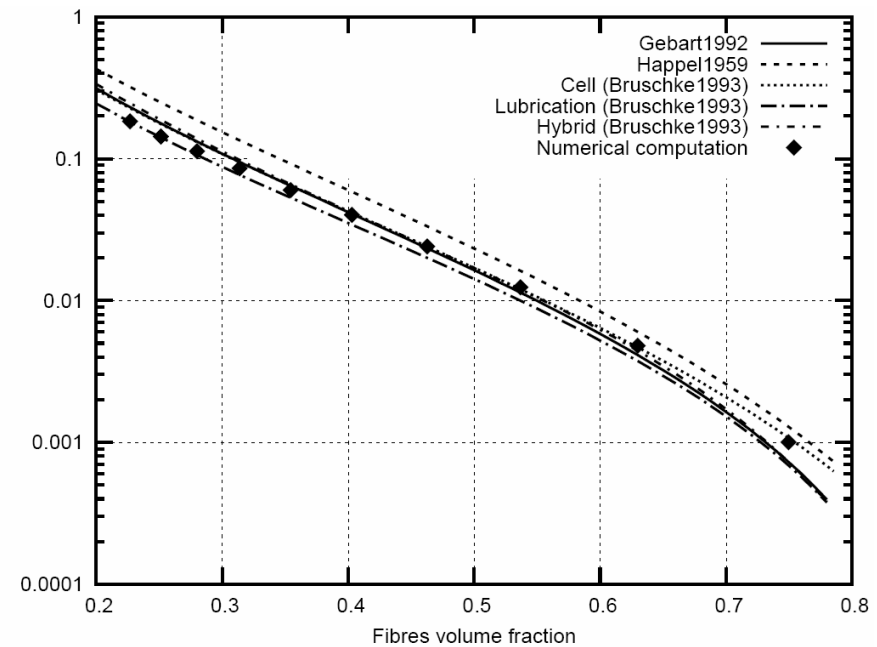
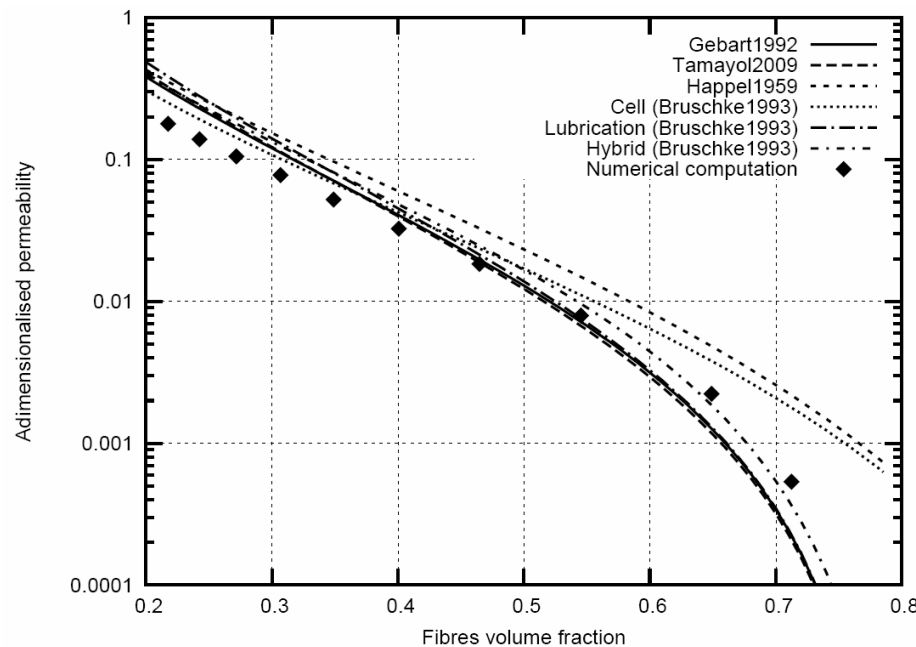
- Perméabilité d'un arrangement régulier de fibres (2D)



(a) Arrangement carré

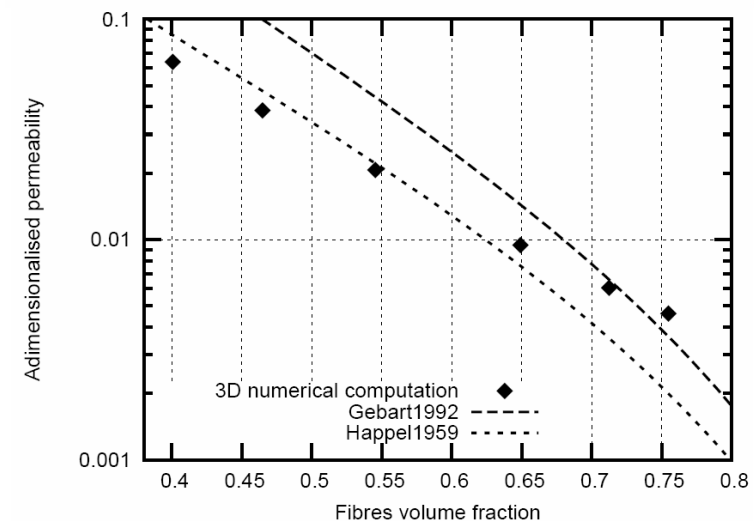
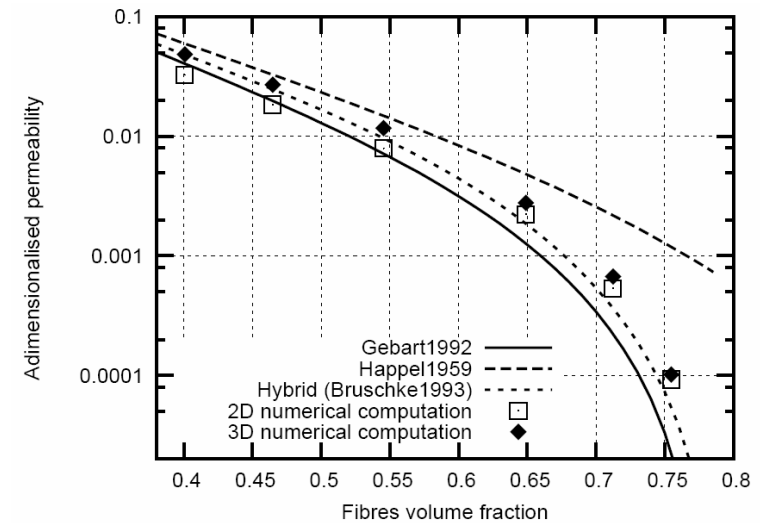
(b) Arrangement triangulaire

- Bon accord avec la littérature
- Proche des modèles pour Vf élevé
- Écart au modèles de cellule pour Vf faible
- Conclusions moins évidentes pour l'arrangement triangulaire



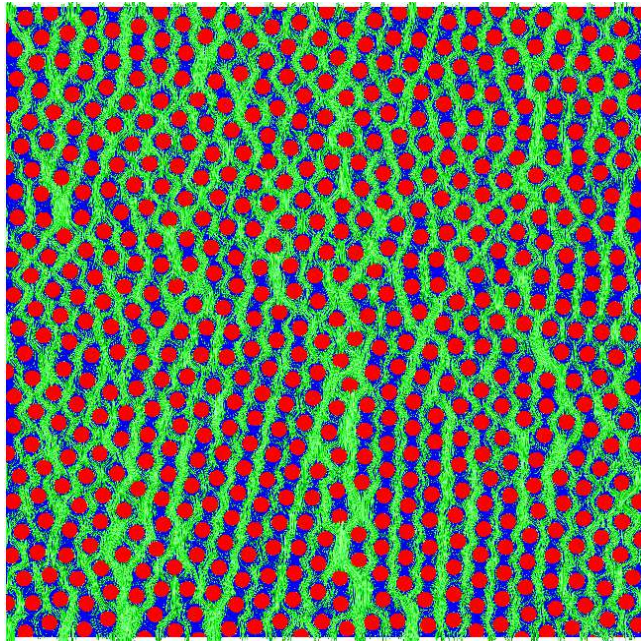
Comparaison avec la littérature

- Perméabilité d'un arrangement régulier de fibres (3D)
 - Transversal
 - Bon accord avec les modèles
 - 10% d'écart avec 2D pour fort Vf
 - 50% d'écart avec 2D pour faible Vf
 - Longitudinal
 - Évolution différentes par rapport aux modèles
 - Hypothèse sur la forme de l'écoulement

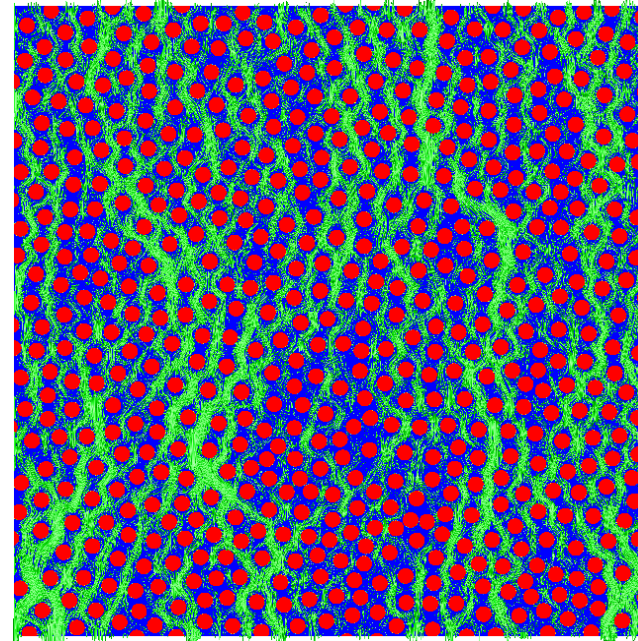


Arrangement aléatoire de fibres

- Distribution statistique de fibres (porosité contrôlée)
 - Travail de thèse de Karim Hitti
 - Application du calcul de perméabilité

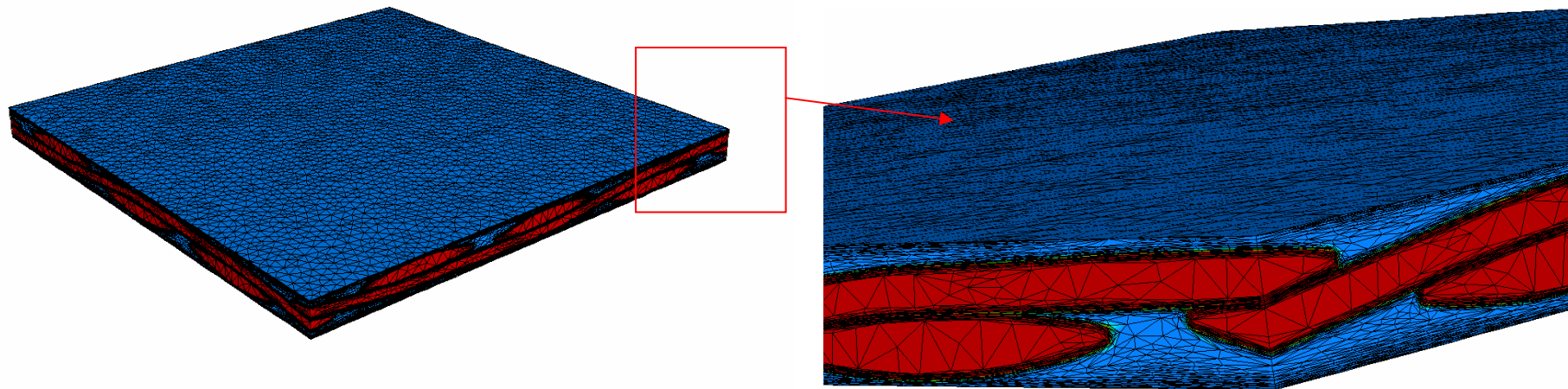
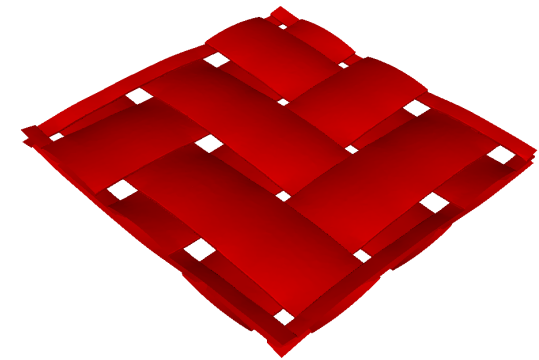


[Hitti2011]



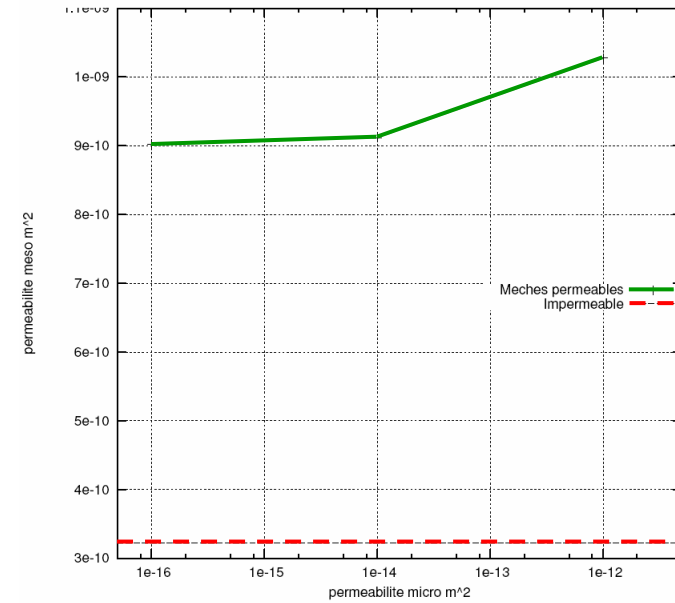
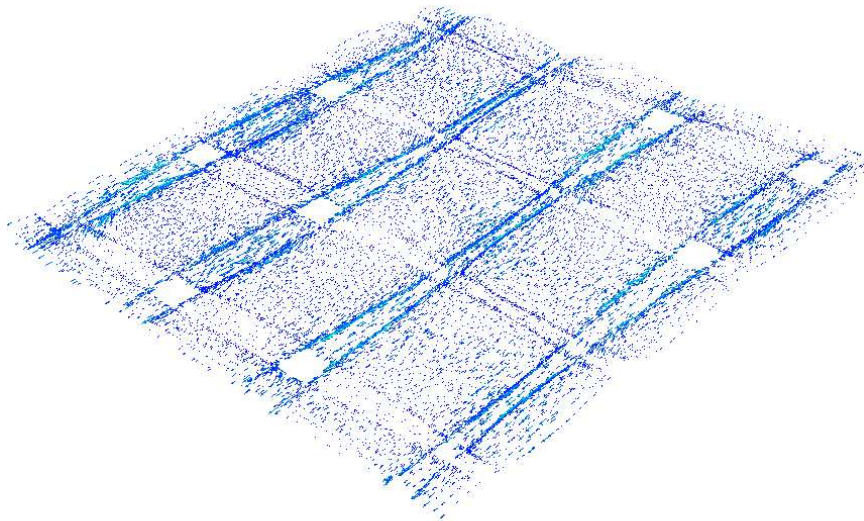
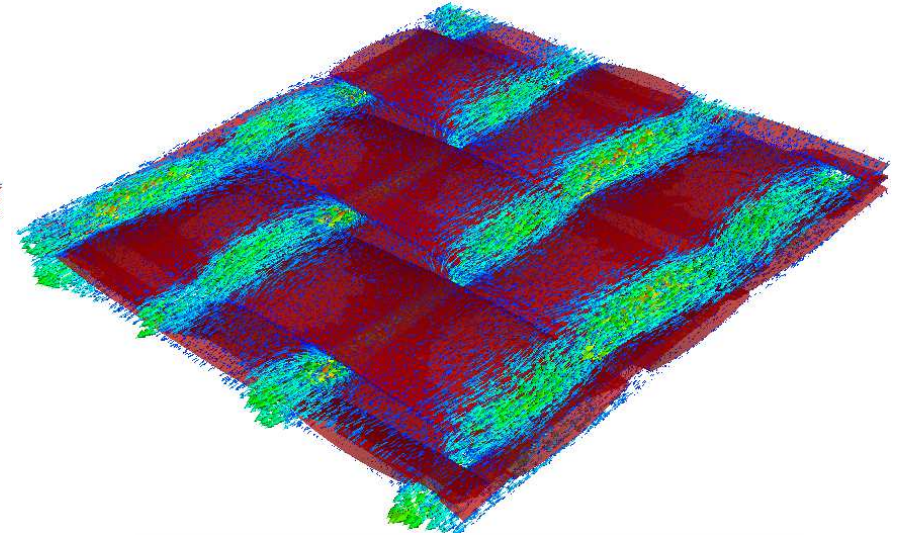
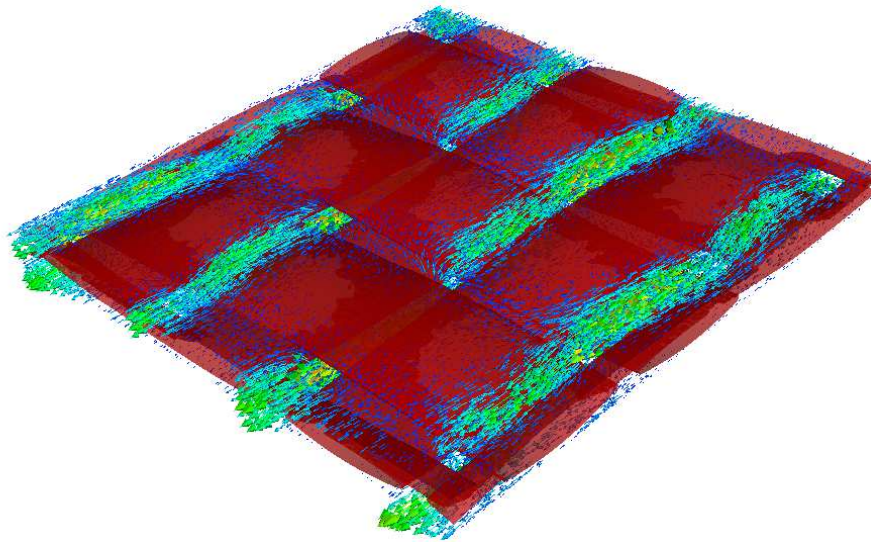
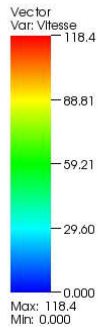
Perméabilité mésoscopique

- Renfort G986 non déformé
- Maillage global correspondant à la cavité du moule
- Écoulement dans le plan des fibres
- Fibres perméables
- Adaptation de maillage anisotrope



Perméabilité mésoscopique

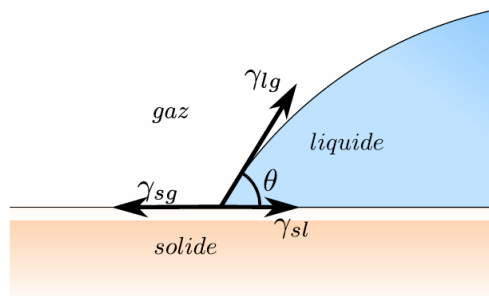
- Renfort G986 non déformé



- Modélisation des écoulements saturés
 - Les différentes échelles d'écoulements
 - Méthodes numériques
- Calcul de la perméabilité
 - Lois analytiques
 - Calcul numérique
- Modélisation des écoulements non saturés
 - Tension de surface
 - Méthodes numériques
- Conclusion et perspectives

Tension de surface

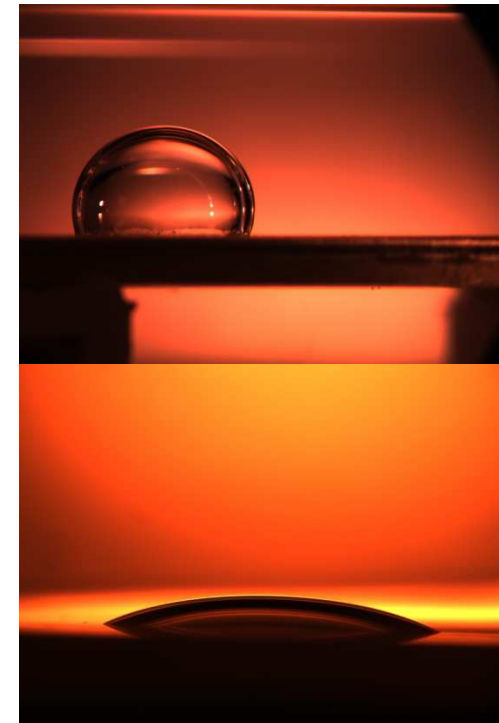
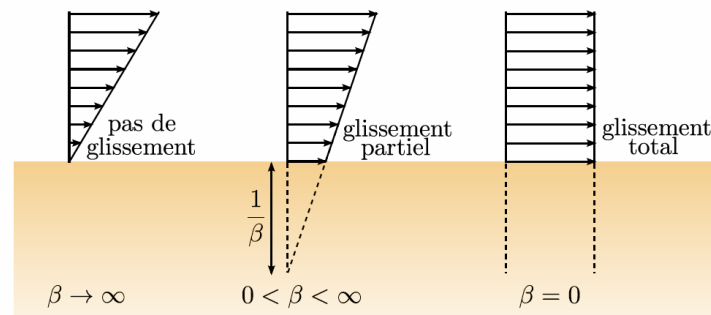
- Phénomène à très petite échelle et à l'interface entre plusieurs fluides non miscibles
- Interactions moléculaires
- Phénomènes capillaires lors de l'imprégnation
 - Force de tension de surface
 - Mouillage



angle de contact

condition de Navier

$$v_{\tau} = \frac{1}{\beta} \frac{\partial v_{\tau}}{\partial n}$$



Modélisation de la tension de surface

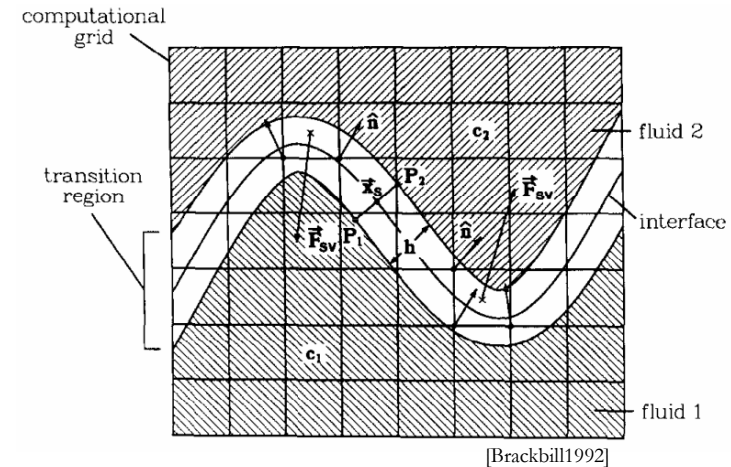
- Force de tension de surface

- Méthode CSF [Brackbill1992]

$$\int_{\Omega} 2\eta\epsilon(\vec{v}) : \epsilon(\vec{w}) - \int_{\Omega} p\nabla \cdot \vec{w} = \int_{\Omega} \vec{F}_v \cdot \vec{w}$$

$$F_s = \gamma\kappa(\vec{x})\vec{n} \quad \vec{n}(\vec{x}) = \frac{\nabla c}{|\nabla c|}$$

$$F_v = \gamma\kappa(\vec{x})\delta_l\vec{n} \quad \kappa(\vec{x}) = -(\nabla \cdot \vec{n})$$



- Méthode CSS [Lafaurie1994, Jacqmin1996, Béliveau1998]

$$\delta_l\vec{n} = \nabla c$$

$$\int_{\Omega} 2\eta\epsilon(\vec{v}) : \epsilon(\vec{w}) - \int_{\Omega} p\nabla \cdot \vec{w} = \int_{\Omega} \gamma\mathbb{T} : \nabla\vec{w}$$

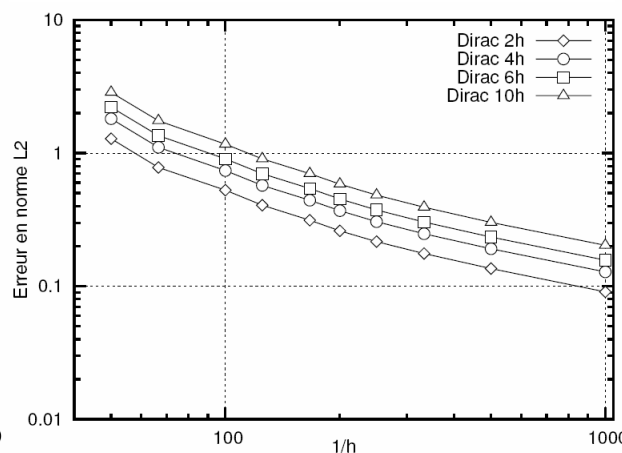
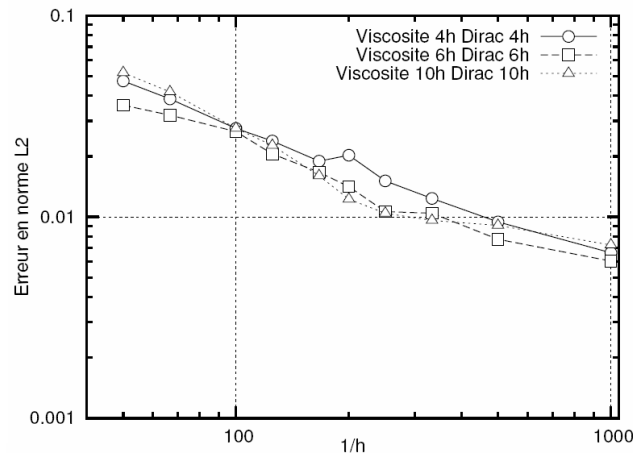
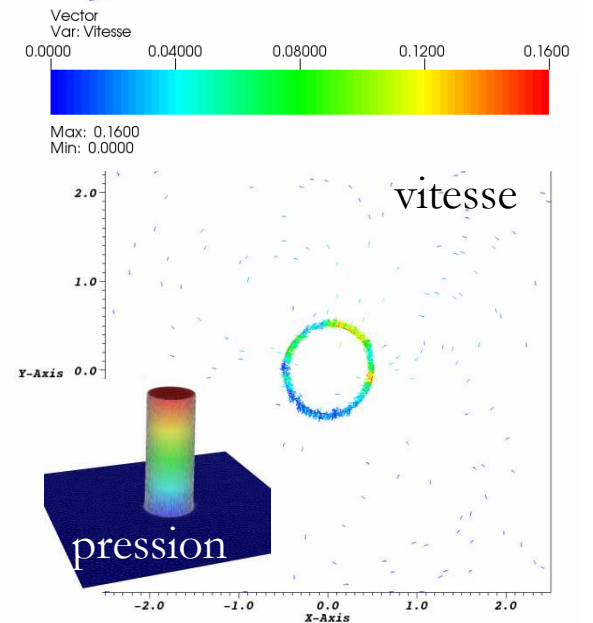
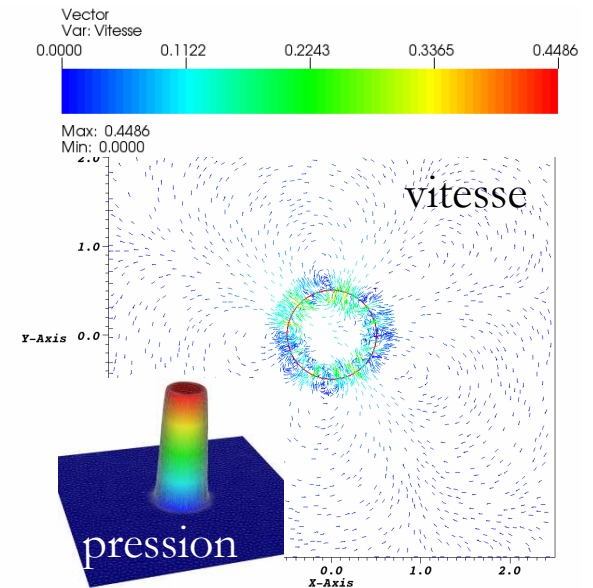
$$\mathbb{T} = \frac{\nabla c \otimes \nabla c - |\nabla c|^2 \mathbb{I}}{|\nabla c|}$$

Validation du modèle

Méthode CSF

- Vitesse
 - Courants parasites diminuent avec la taille de maille
 - Erreur minimale si épaisseurs de Dirac et de mélange de viscosité identiques
- Pression
 - Erreur minimale pour une épaisseur la plus fine
 - Erreur max constante avec la taille de maille
- Épaisseurs identiques et de 4 éléments

$$\text{Loi de Laplace : } \Delta p = \gamma \left(\frac{1}{r'} + \frac{1}{r''} \right) = \kappa \gamma$$



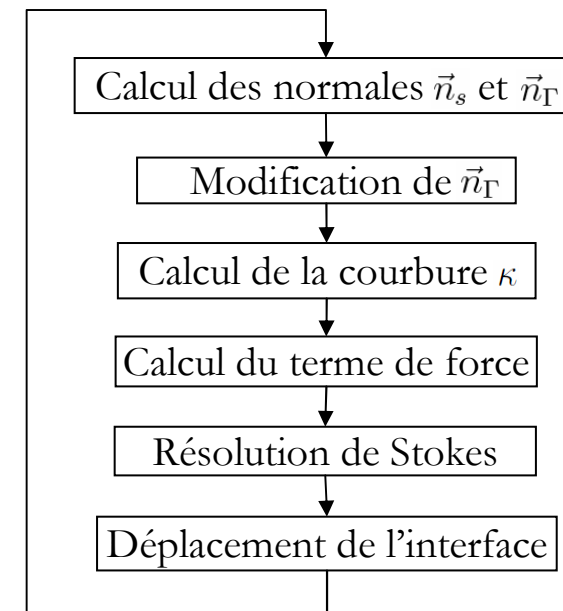
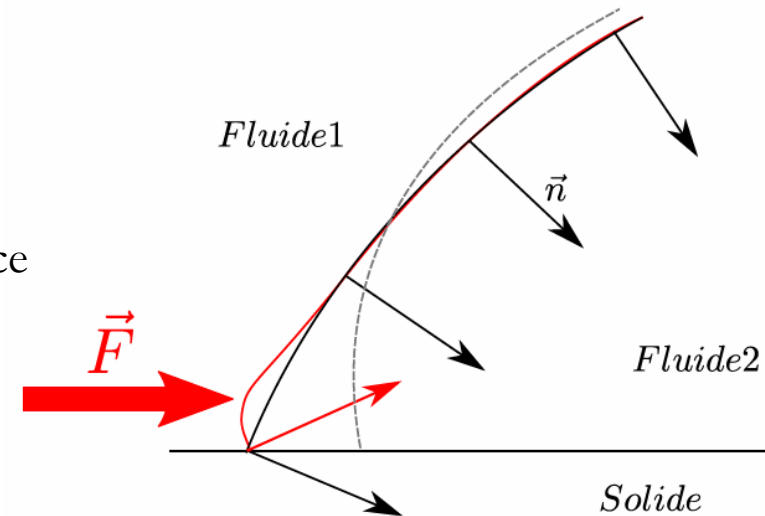
Prise en compte de l'angle de contact

- Prise en compte de l'angle de contact
 - Level-set linéaire
 - Angle de contact non imposable directement
 - Utilisation d'une force pour déplacer l'interface de manière à respecter l'angle de contact

$$F_v = \gamma \kappa(\vec{x}) \delta_l \vec{n} \quad \vec{n}(\vec{x}) = \frac{\nabla c}{|\nabla c|}$$

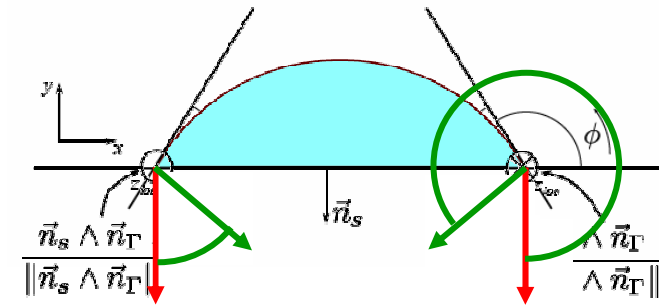
$$\kappa(\vec{x}) = -(\nabla \cdot \vec{n})$$

- Modification locale de la normale à l'interface
 - Modification locale de la courbure
 - Modification locale de la force pour lisser la courbure



Prise en compte de l'angle de contact

- Prise en compte de l'angle de contact
 - Modification de la normale
 - Rotation de la normale à la surface solide
 - Remplacement de la normale sur la ligne triple
 - Calcul de l'orientation
 - Angle défini à l'intérieur du fluide
 - Rotation différente en chaque point de la ligne triple
 - Calcul de l'axe de rotation

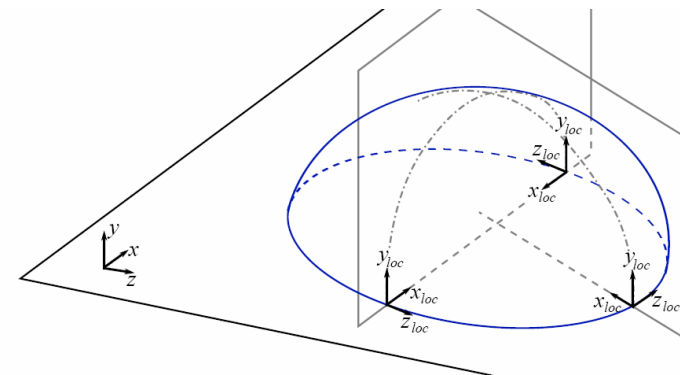


$$\vec{\Omega} = \frac{\vec{n}_s \wedge \vec{n}_\Gamma}{\|\vec{n}_s \wedge \vec{n}_\Gamma\|}$$

- Transformation de la normale dans le repère global

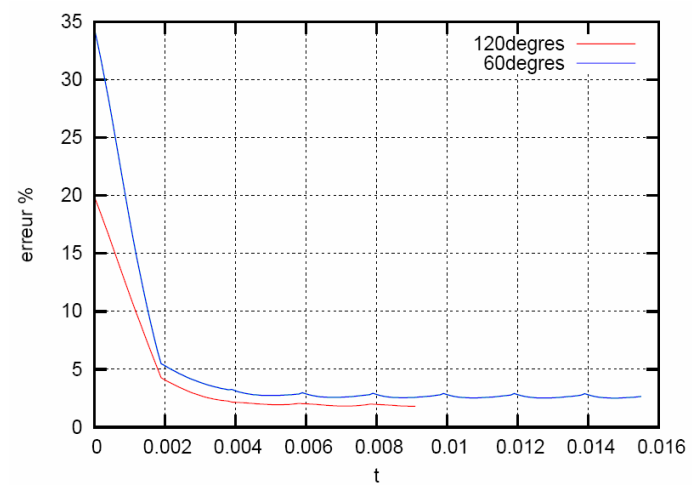
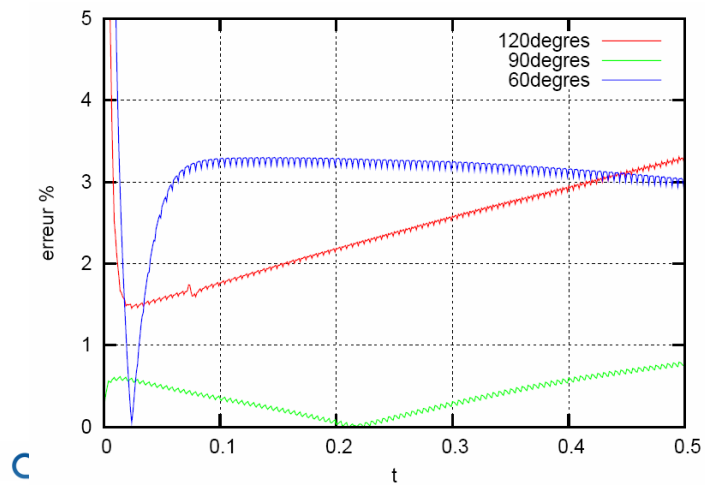
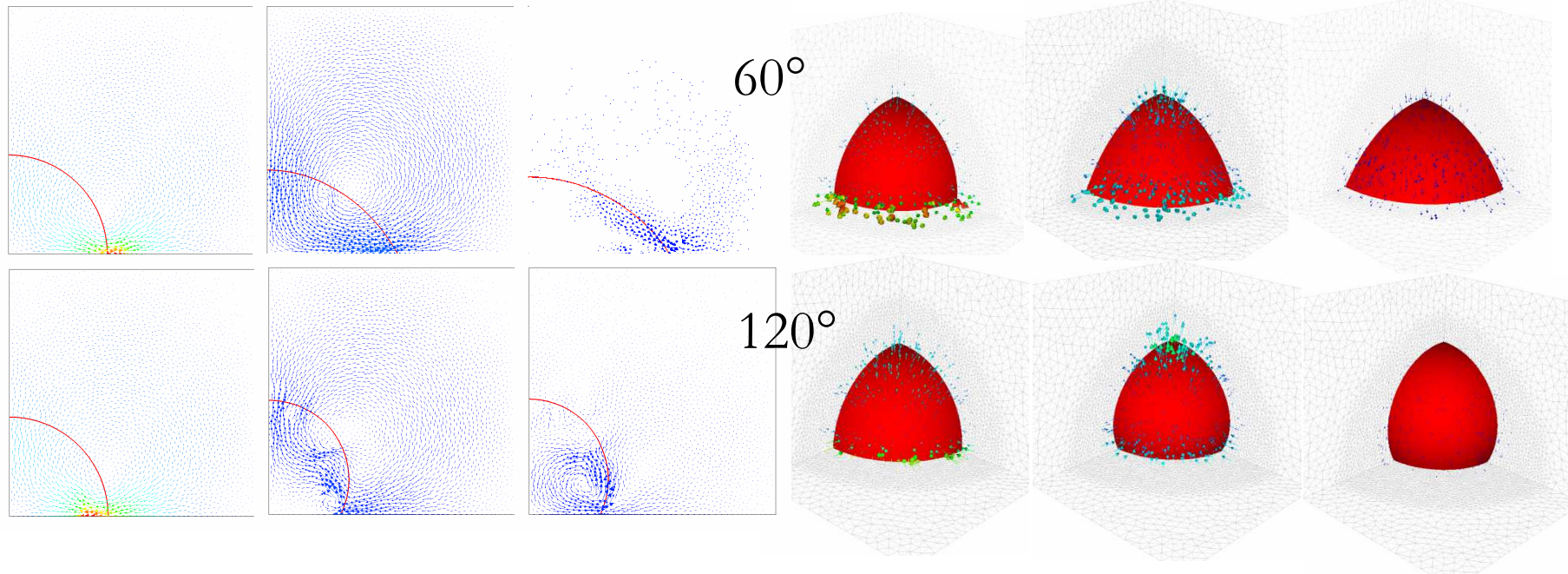
$$R = \begin{bmatrix} \Omega_x^2 + (1 - \Omega_x^2)c & \Omega_x \Omega_y (1 - c) - \Omega_z s & \Omega_x \Omega_z (1 - c) + \Omega_y s \\ \Omega_x \Omega_y (1 - c) + \Omega_z s & \Omega_y^2 + (1 - \Omega_y^2)c & \Omega_y \Omega_z (1 - c) - \Omega_x s \\ \Omega_x \Omega_z (1 - c) - \Omega_y s & \Omega_y \Omega_z (1 - c) + \Omega_x s & \Omega_z^2 + (1 - \Omega_z^2)c \end{bmatrix}$$

$$c = \cos \psi \quad s = \sin \psi \quad \psi = \pi - \theta.$$



Prise en compte de l'angle de contact

- Validation de l'imposition de l'angle de contact



Condition aux limites de Navier

- Implémentation de la condition aux limites de Navier

- Formulation faible

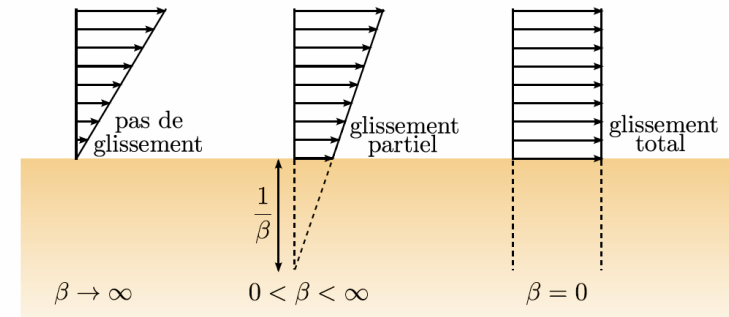
$$\begin{cases} \int_{\Omega} 2\eta\epsilon(\vec{v}) : \epsilon(\vec{w}) \, d\Omega - \int_{\Omega} p\nabla \cdot \vec{w} \, d\Omega = \int_{\Omega} \vec{F} \cdot \vec{w} \, d\Omega + \int_{\Gamma} (\sigma \cdot \vec{n}) \cdot \vec{w} \, d\Gamma \\ \int_{\Omega} q\nabla \cdot \vec{v} \, d\Omega = 0 \end{cases}$$

- Condition de Navier (vitesse tangentielle)

$$\beta(\vec{v} \cdot \vec{t})\vec{t} = [(\sigma \cdot \vec{n}) \cdot \vec{t}] \cdot \vec{t} \quad (\vec{v} \cdot \vec{t})\vec{t} = \vec{v} - (\vec{v} \cdot \vec{n})\vec{n}$$

- Condition de non pénétration (vitesse normale)

$$\vec{v} \cdot \vec{n} = 0$$



- Application sur une frontière

- Terme de condition aux limite de Navier (vitesse normale pénalisée)

$$\int_{\Gamma_{\text{slip}}} (\sigma \cdot \vec{n}) \cdot \vec{w} \, d\Gamma = \int_{\Gamma_{\text{slip}}} A_p [(\vec{v} \cdot \vec{n})] \vec{n} \cdot \vec{w} \, d\Gamma - \int_{\Gamma_{\text{slip}}} \beta (\vec{v} - [\vec{v} \cdot \vec{n}] \vec{n}) \cdot \vec{w} \, d\Gamma$$

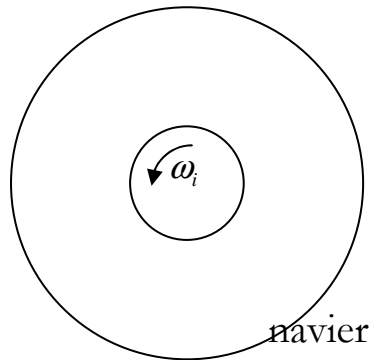
- Application sur une interface fluide

- Transformation de la condition aux limites en contribution volumique

$$\int_{\Gamma_{\text{slip}}} (\beta\vec{v} - (A_p + \beta) [\vec{v} \cdot \vec{n}] \vec{n}) \cdot \vec{w} \, d\Gamma = \int_{\Omega} (\beta\vec{v} - (A_p + \beta) [\vec{v} \cdot \vec{n}] \vec{n}) \cdot \vec{w} \delta(\alpha) \, d\Gamma$$

Condition aux limites de Navier

- Validation de la condition aux limites de Navier
 - Couette cylindrique



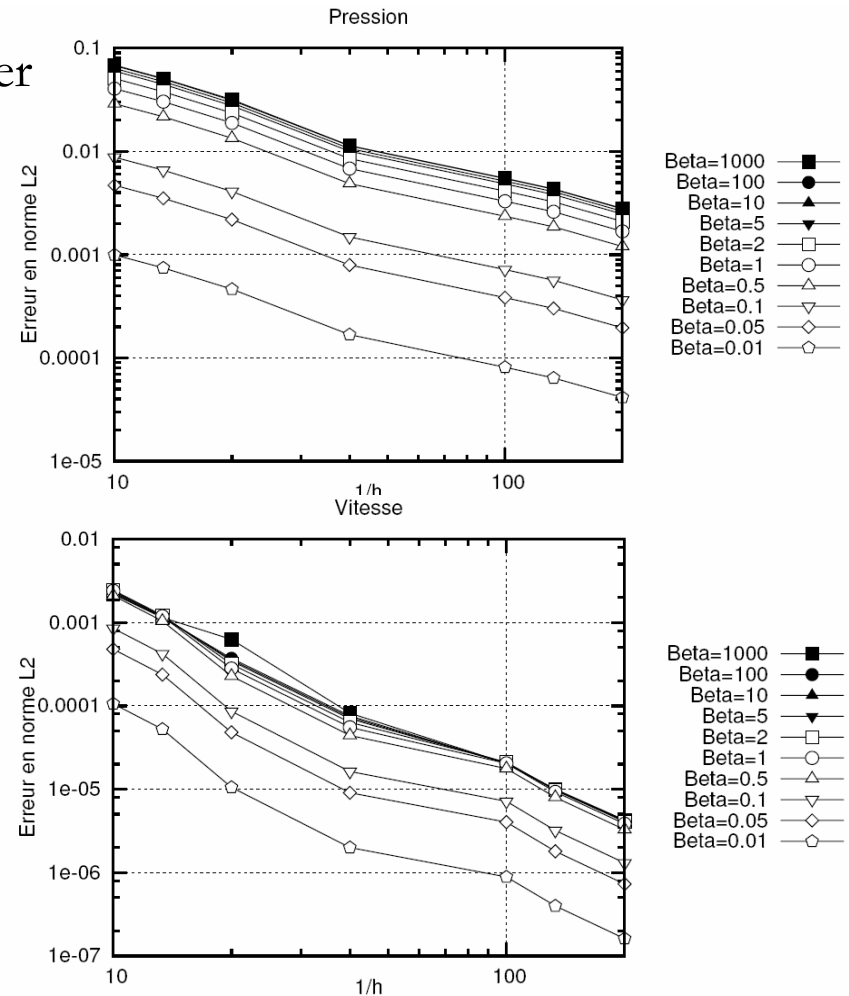
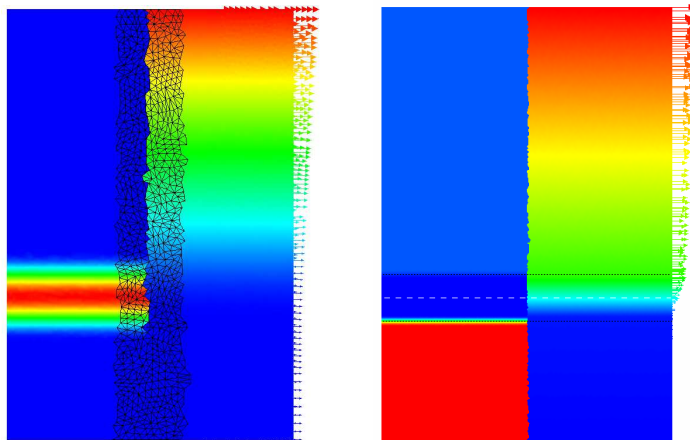
Solution analytique :

$$v_\theta = Ar + \frac{B}{r}$$

$$A = \frac{-R_i^2 \omega_i (\beta R_o + 2\eta)}{\beta R_o^3 - \beta R_o R_i^2 - 2\eta R_i^2}$$

$$B = \frac{R_i^2 \omega_i \beta R_o^3}{\beta R_o^3 - \beta R_o R_i^2 - 2\eta R_i^2}$$

- Faisabilité de l'application sur une interface floue



- Modélisation des écoulements saturés
 - Les différentes échelles d'écoulements
 - Méthodes numériques
- Calcul de la perméabilité
 - Lois analytiques
 - Calcul numérique
- Modélisation des écoulements non saturés
 - Tension de surface
 - Méthodes numériques
- Conclusion et perspectives

- Perméabilité
 - Méthode d’immersion de domaines
 - Couplage Stokes-Poreux par le développement d’un solveur de Brinkman
 - Mise en place des principales méthodes permettant de calculer la perméabilité de milieux complexes

- Tension de surface
 - Méthode Level-Set pour la représentation et la convection de l’interface
 - Comparaison et validation des méthodes CSF et CSS
 - Développement d’une méthode de prise en compte de l’angle de contact
 - Implémentation de la condition de Navier sur une frontière

- Perméabilité
 - Améliorations sur la stabilisation de la méthode d'immersion de domaines
 - Poursuite du travail sur le couplage Stokes-Darcy
 - Calcul de perméabilité sur des configurations issues de tomographie pour comparaisons expérimentales
- Tension de surface
 - Angle de contact dynamique
 - Implémentation de la condition de Navier généralisée
 - Implémentation de la condition de Navier sur une interface diffuse

Merci pour votre attention.