



Modélisation numérique thermo- hydrodynamique et inductive d'une fonte verrière élaborée en creuset froid

Emilien Sauvage

Laboratoire de Développement de Procédés de Vitrification

DEN/DTCD/SCDV/LDPV

CEA Marcoule

Plan de la présentation

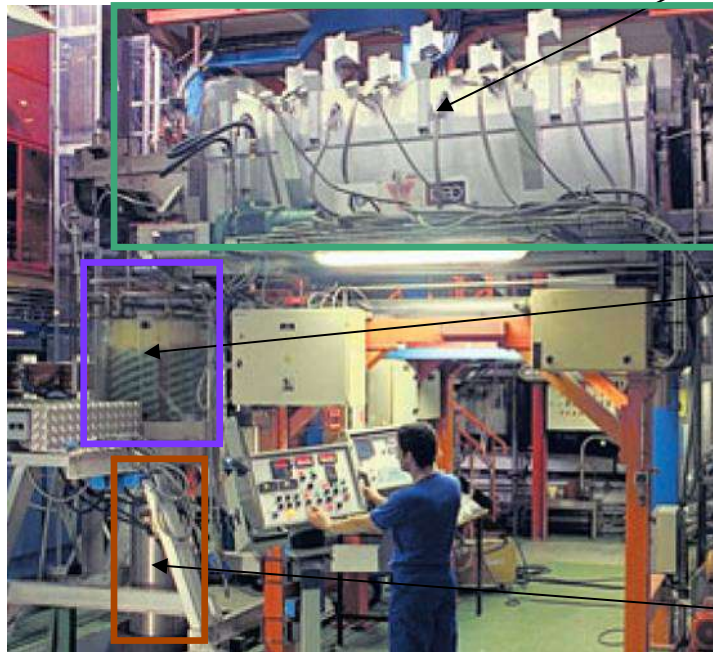


- Présentation de la technologie du creuset froid
- Principales hypothèses de la simulation numérique
- Simulation thermohydraulique
- Simulation chauffage par induction
- Couplage des phénomènes et exemples
- Importance des propriétés physiques
- Perspectives de la simulation des procédés de vitrification

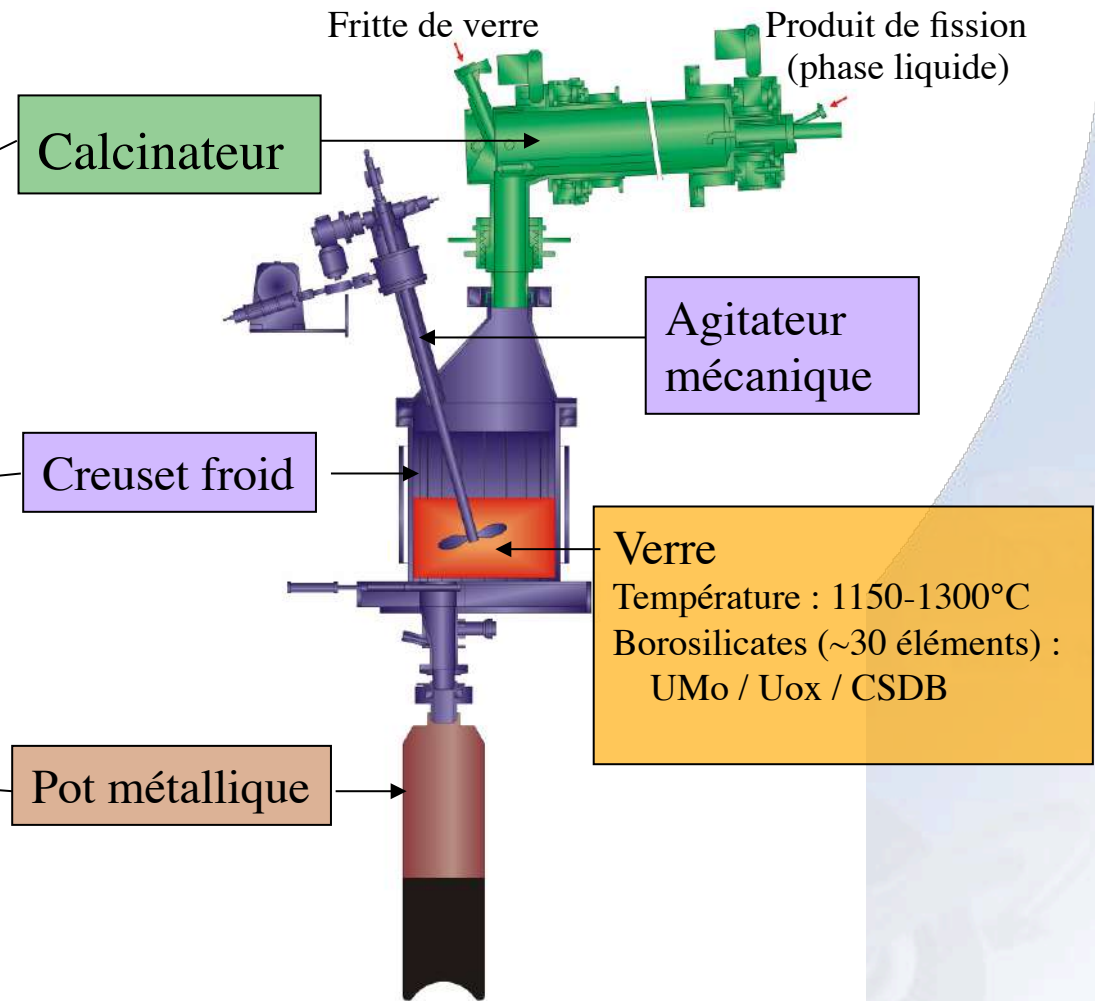
Procédé de vitrification à deux étapes



Contexte
Bullage
Couplage
Perspective



Pilote du procédé de vitrification
CEA Marcoule (cellule inactive)



Principe de fonctionnement d'un creuset froid



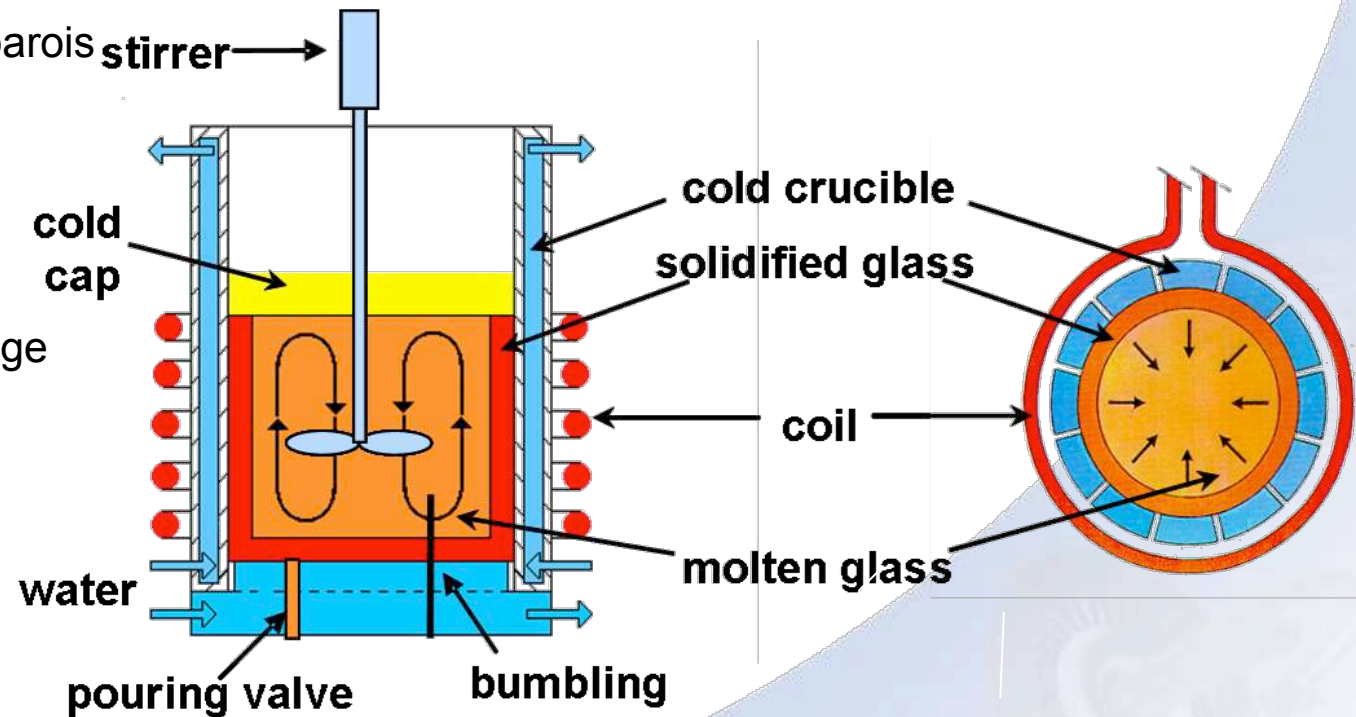
Température du verre : 1000-2000 °C

Puissance générateur : 400 kW

Fréquence d'induction : 300 kHz

Caractéristiques:

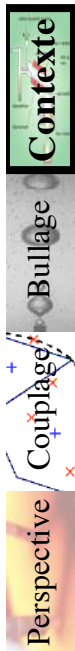
- refroidissement des parois du creuset sectorisé
- présence d'un autocreuset
- système de brassage mécanique et par bullage





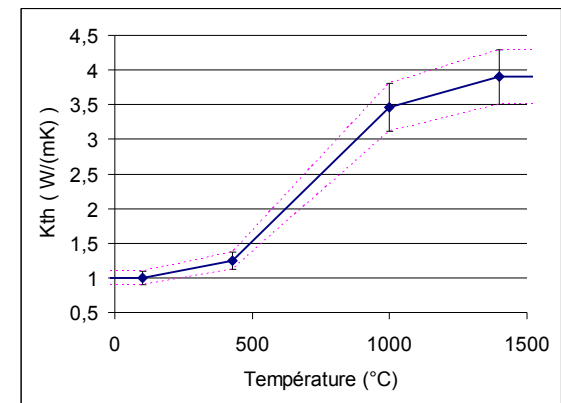
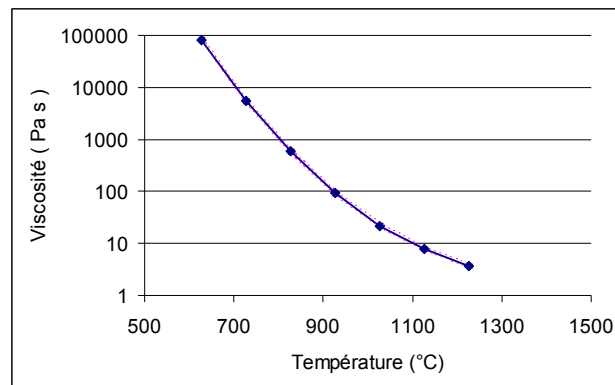
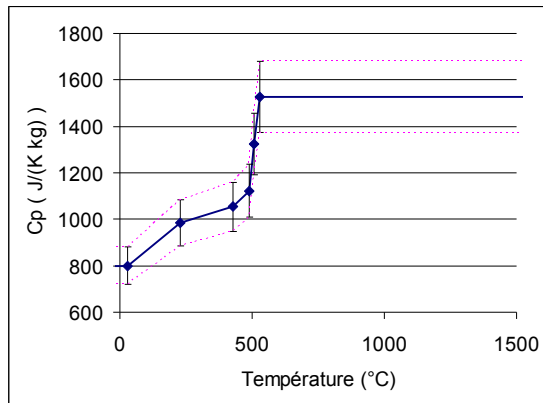
Intérêt de la simulation numérique

- Objectif principal : simuler l'écoulement du verre fondu et l'équilibre thermique
 - Optimiser l'homogénéité thermique et chimique
 - Support pour le contrôle du procédé
 - A terme : outil prédictif pour optimiser le nombre d'essais réels
- Difficultés
 - Géométrie complexe fortement 3D
 - Nombre important de physiques impliquées
 - Induction directe
 - Convection naturelle et forcée (agitateur, bulleur)
 - Transferts radiatifs
 - Dépendance des propriétés physiques du verre avec la température





Propriété physique	Unité	500 K	1500 K
Conductivité électrique	$\Omega^{-1}.m^{-1}$	10^{-5}	20
Viscosité dynamique	$Pa.s$	10^{14}	1
Chaleur spécifique	$J.kg^{-1}.K^{-1}$	900	1500
Conductivité thermique	$W.m^{-1}.K^{-1}$	1	6
Masse volumique	$kg.m^{-3}$	2850	2750



- Hypothèses

- Verre est opaque : pas de modèle de rayonnement interne
- Le verre est supposé être un fluide Newtonien
- Ecoulement laminaire (forte viscosité du verre)
- Forces de brassage électromagnétique sont négligées devant les forces de convection naturelle et forcée

- Couplage Induction - Thermique
- Couplage fort itératif 3D-3D pour la partie "verre"



Par transfert de fichier

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu_0} \text{rot}(\mathbf{A}) \right) + \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \text{grad}V \right) = \mathbf{j}$$

$$\mathbf{j} = -\sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \text{grad}V \right)$$

Conductivité électrique

$$\log_{10}(\sigma) = a + \frac{b}{T}$$

Electromagnétisme
3D

FLUX® A, V

Thermohydraulique
3D
FLUENT® T, u

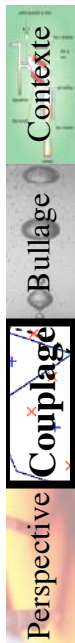
Densité de puissance Joule

$$Q_{th} = \frac{|\mathbf{j}|^2}{2\sigma}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0,$$

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho_0 (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) \vec{u} = -\vec{\nabla} p^* - \vec{\nabla} \wedge (\mu \vec{\nabla} \wedge \vec{u}) - \rho_0 \beta (T - T_0) \vec{g}$$

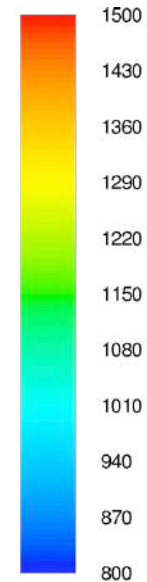
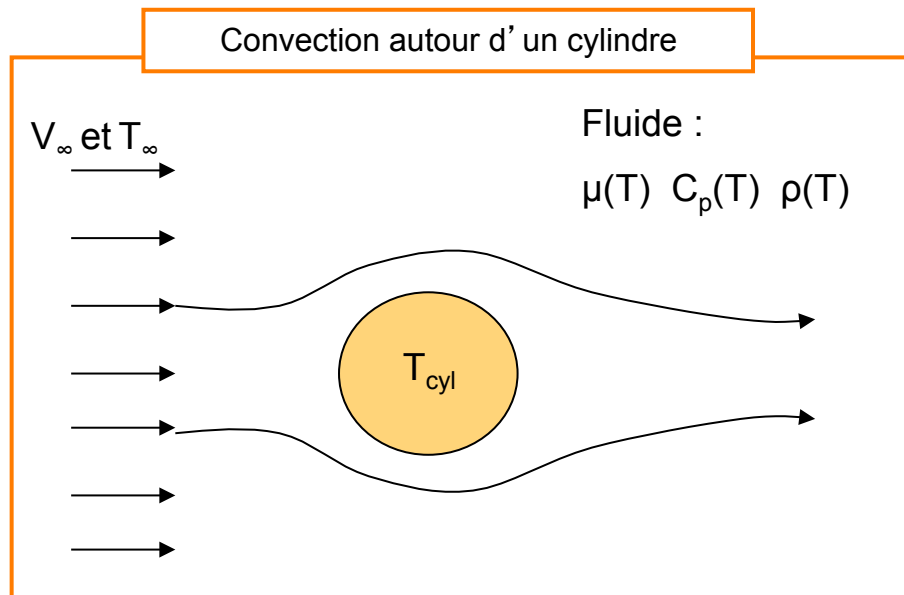
$$\rho_0 \frac{\partial}{\partial t} (c_p T) + \rho_0 \vec{\nabla} \cdot (c_p T \vec{u}) = \vec{\nabla} \cdot (\lambda \vec{\nabla} T) + Q_{th}$$



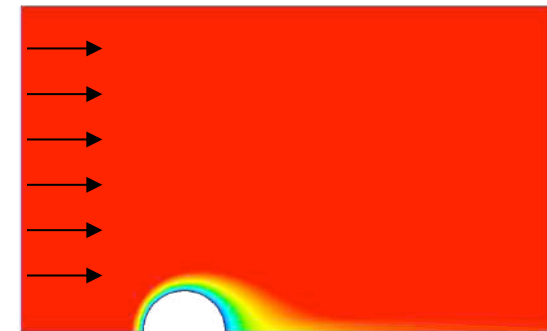
- Couplage thermique - hydraulique



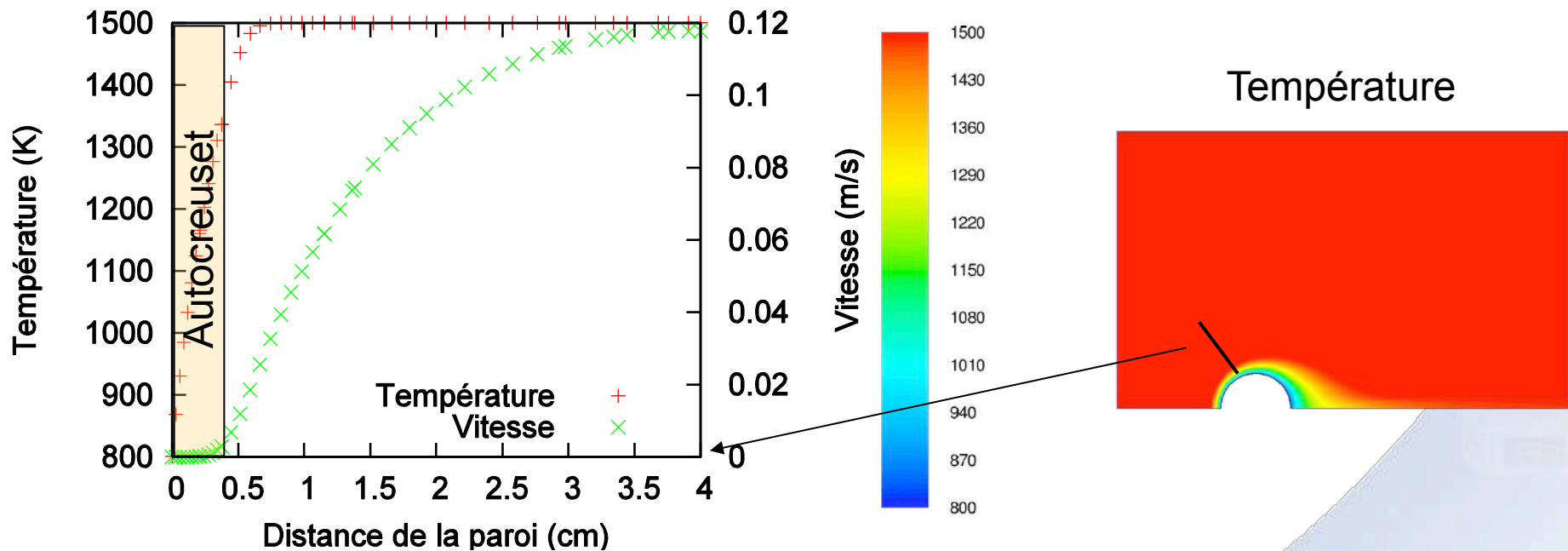
- Étude sur les couches limites thermique et hydrodynamique en creuset froid



Température



- Profil de température et de vitesse le long d'un axe normal au cylindre (-45° par rapport à la verticale) $T_\infty=1500$ K, $T_{cyl}=800$ K et $V_\infty=0,1$ m/s ($Re=3$)



→ La puissance thermique échangée n'est pas proportionnelle à $(T_{inf}-T_{cyl})$ mais à $(T_{inf}-T_{auto})$ où T_{auto} est constante

- Couplage Induction - Thermique
- Couplage fort itératif 3D-3D pour la partie "verre"



Par transfert de fichier

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu_0} \text{rot} (\mathbf{A}) \right) + \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \text{grad} V \right) = \mathbf{j}$$

$$\mathbf{j} = -\sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \text{grad} V \right)$$

Conductivité électrique

$$\log_{10}(\sigma) = a + \frac{b}{T}$$

Electromagnétisme
3D

FLUX® A, V

Thermohydraulique
3D
FLUENT® T, u

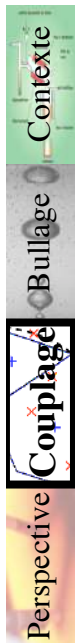
Densité de puissance Joule

$$Q_{th} = \frac{|\mathbf{j}|^2}{2\sigma}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0,$$

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho_0 (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) \vec{u} = -\vec{\nabla} p^* - \vec{\nabla} \wedge (\mu \vec{\nabla} \wedge \vec{u}) - \rho_0 \beta (T - T_0) \vec{g}$$

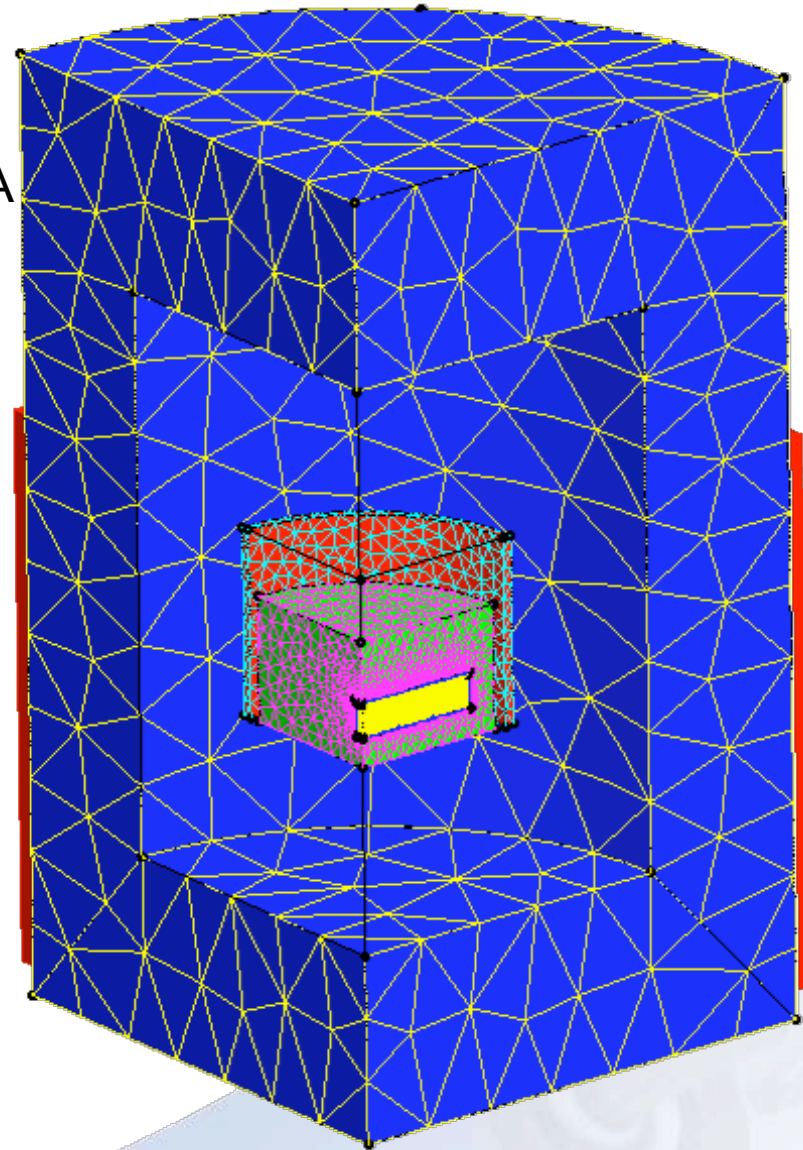
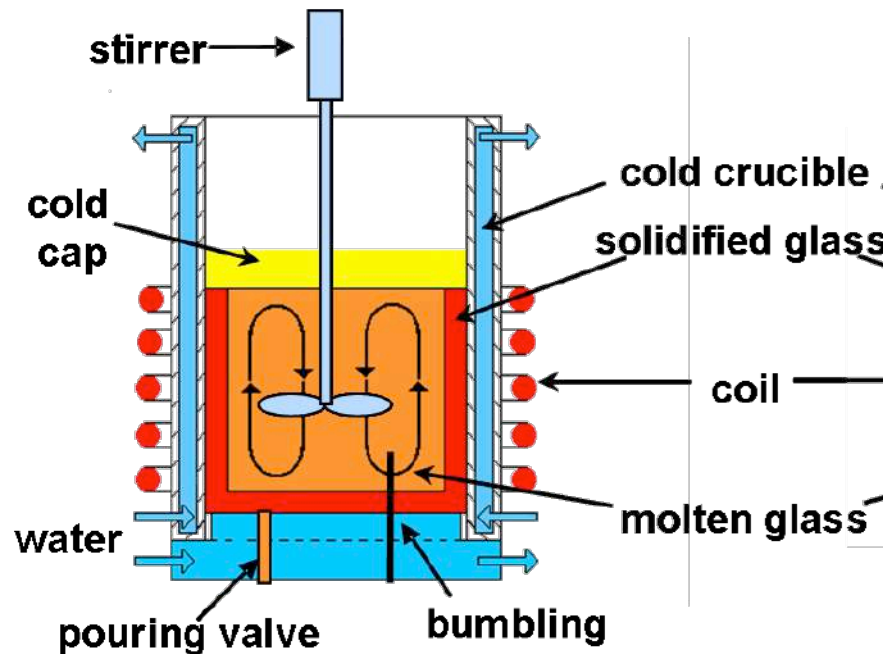
$$\rho_0 \frac{\partial}{\partial t} (c_p T) + \rho_0 \vec{\nabla} \cdot (c_p T \vec{u}) = \vec{\nabla} \cdot (\lambda \vec{\nabla} T) + Q_{th}$$



Etude électromagnétique 3D



- Courant alternatif 280 kHz et $I_{\text{eff}}=1500\text{A}$
- Creuset et inducteur simplifiés
- Boite infinie



Etude électromagnétique 3D



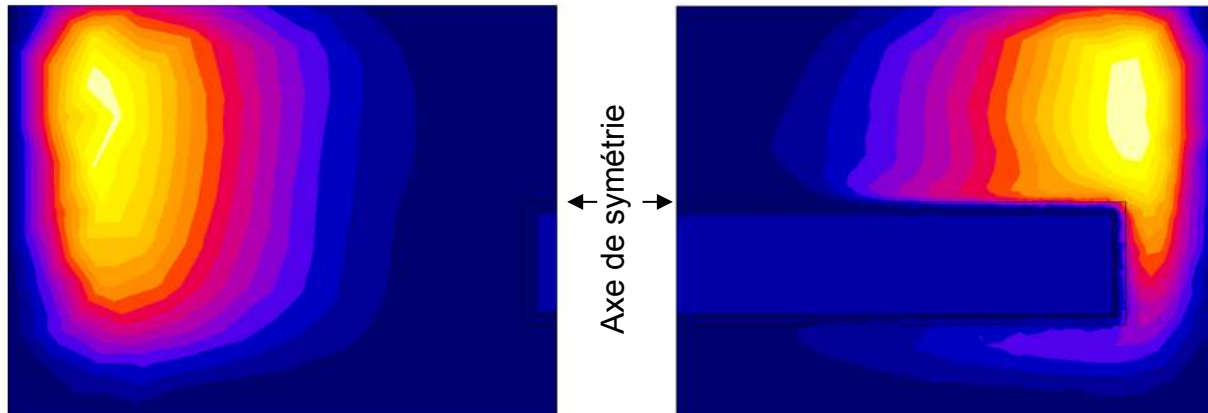
- Cas test
- Choix de formulations :

AV

+ bonne convergence, puissance Joule bien calculée malgré les fortes variations de conductivité électrique

- conservation du courant, coût numérique

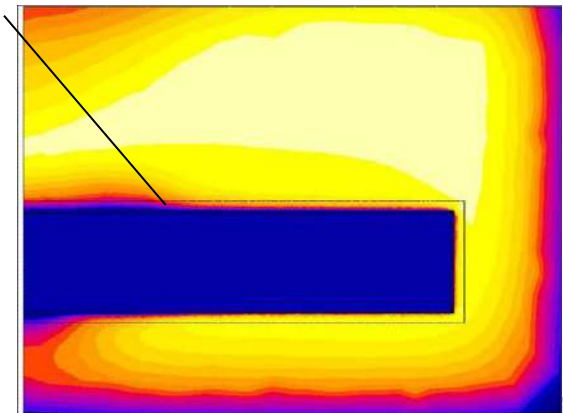
Répartition de la densité de puissance Joule



Très peu de courant induit dans le verre passent à travers l'autocreuset.

La pale est isolée électriquement du verre

Fine couche froide : autocreuset



Champ de température utilisé pour calculer la conductivité électrique du verre

- Couplage Induction - Thermique
- Couplage fort itératif 3D-3D pour la partie "verre"

cei - Par transfert de fichier

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu_0} \text{rot}(\mathbf{A}) \right) + \sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \text{grad}V \right) = \mathbf{j}$$

$$\mathbf{j} = -\sigma \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \text{grad}V \right)$$

Conductivité électrique

$$\log_{10}(\sigma) = a + \frac{b}{T}$$

Electromagnétisme
3D

FLUX® A, V

Thermohydraulique
3D
FLUENT® T, u

Densité de puissance Joule

$$Q_{th} = \frac{|\mathbf{j}|^2}{2\sigma}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0,$$

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho_0 (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) \vec{u} = -\vec{\nabla} p^* - \vec{\nabla} \wedge (\mu \vec{\nabla} \wedge \vec{u}) - \rho_0 \beta (T - T_0) \vec{g}$$

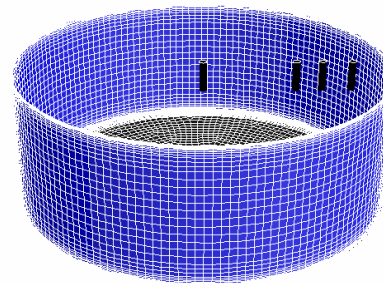
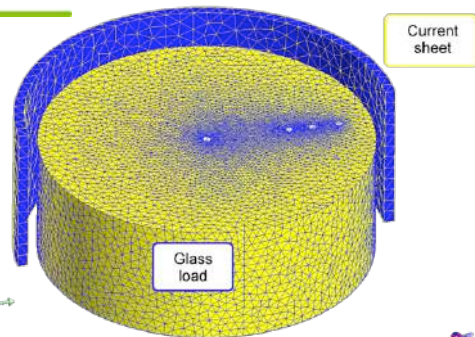
$$\rho_0 \frac{\partial}{\partial t} (c_p T) + \rho_0 \vec{\nabla} \cdot (c_p T \vec{u}) = \vec{\nabla} \cdot (\lambda \vec{\nabla} T) + Q_{th}$$

Cas d'étude : cuve sans agitation (Erebus)



Flux[®]

Fluent[®]



Couplage itératif entre les deux logiciels

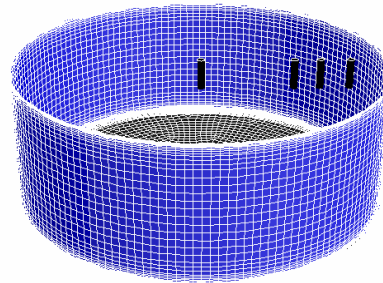
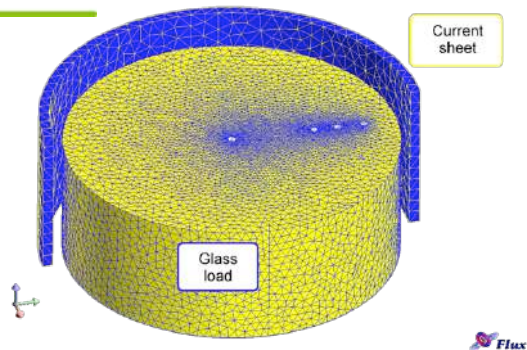
- Δt hydrodynamique 1s
- Couplage toutes les 10s \ll temps caractéristique convectif ~ 500 s
- Temps de calculs 2-3 semaines pour 20 000 s résolues

Cas d'étude : cuve sans agitation (Erebus)

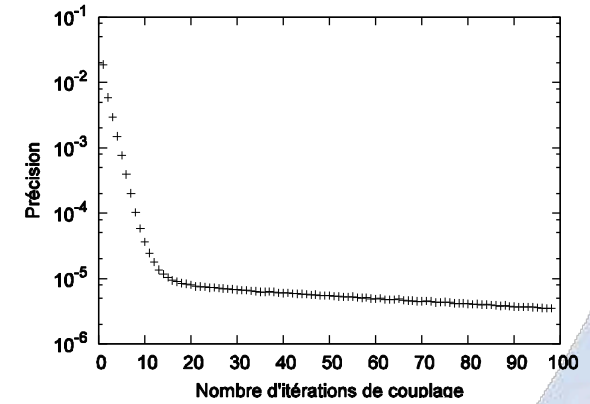


Flux®

Fluent®



Convergence du couplage

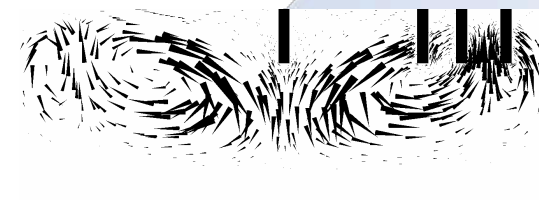
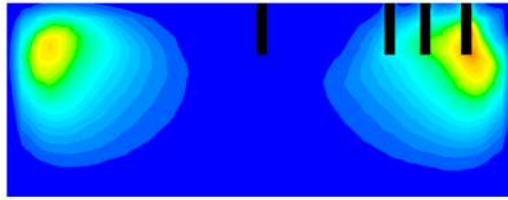
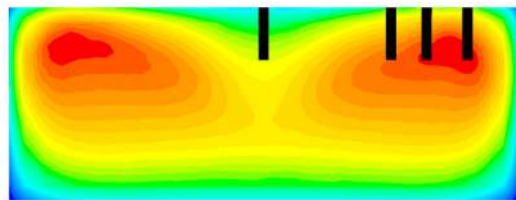


Puissance Joule totale injectée : 45 kW

Température (K)

Densité de puissance Joule (W/m³)

vecteurs vitesse (m/s)



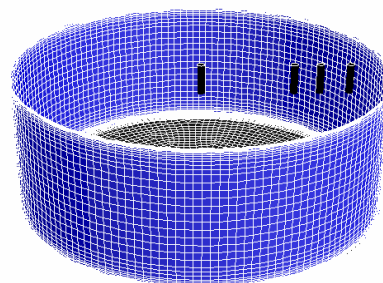
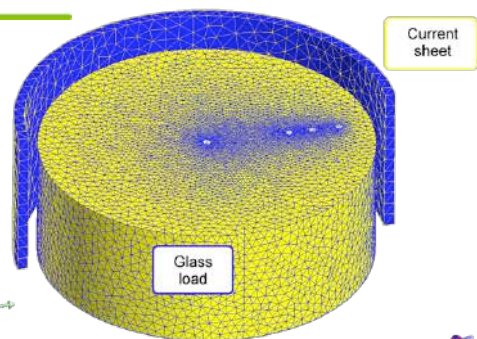
- Contexte
- Bouillage
- Couplage
- Perspective

Cas d'étude : cuve sans agitation (Erebus)



Flux®

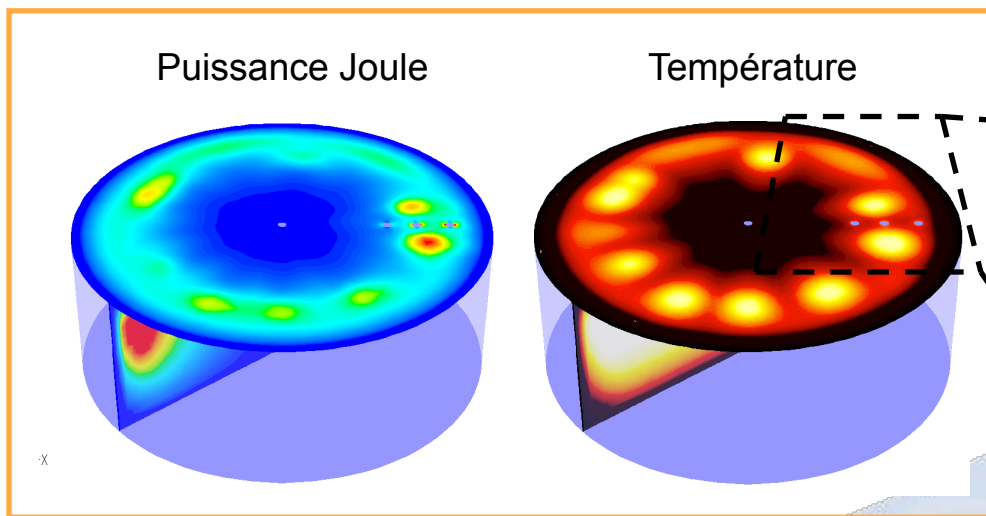
Fluent®



Puissance Joule totale injectée : 55 kW

Instabilité thermoconvective de type Bénard Marangoni

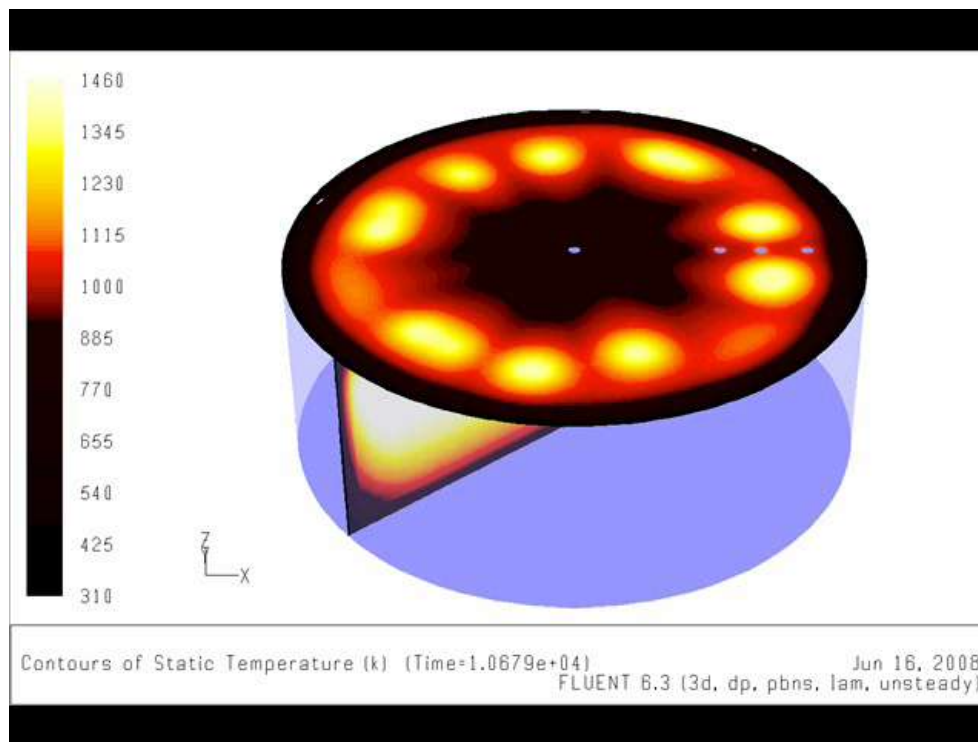
- Contexte
- Bullage
- Couplage
- Perspective



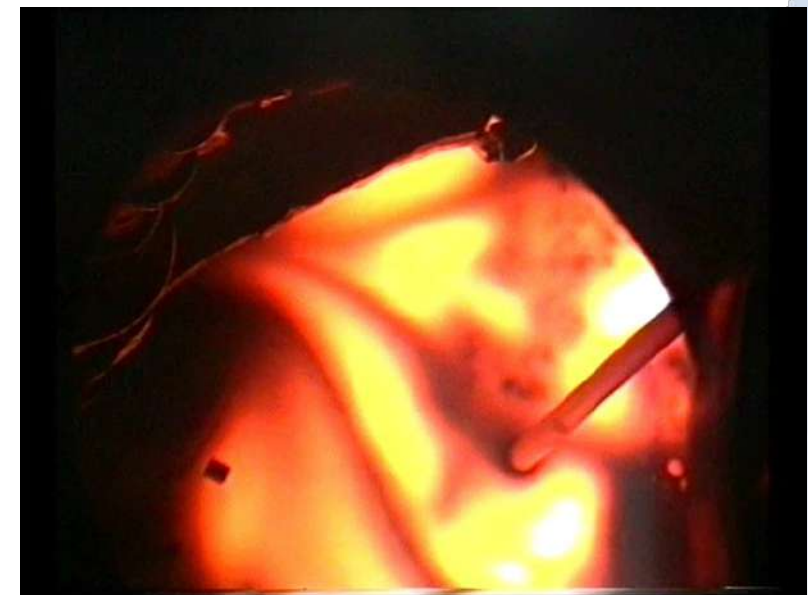
Cas d'étude : cuve sans agitation (Erebus)



- Perspective
- Couplage**
- Bullage
- Contexte



X 300

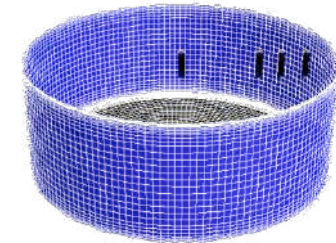


X 100

Cas d'étude : cuve sans agitation (Erebus)

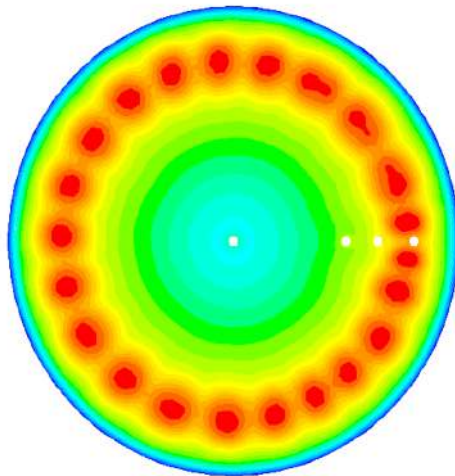


- Puissance Joule totale injectée : 55kW



Résultat obtenu avec un calcul axisymétrique (2D) de l'induction

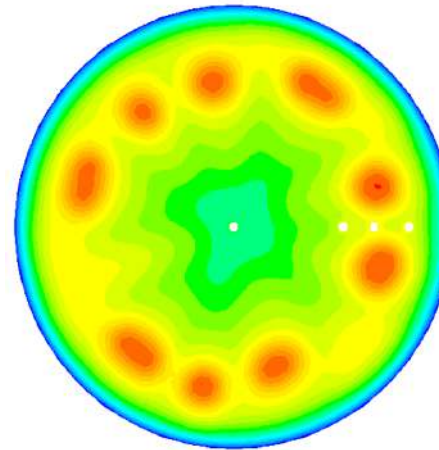
Température



- Cellules indépendantes du temps

Induction 3D couplée

Température

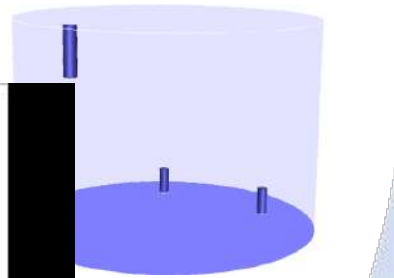
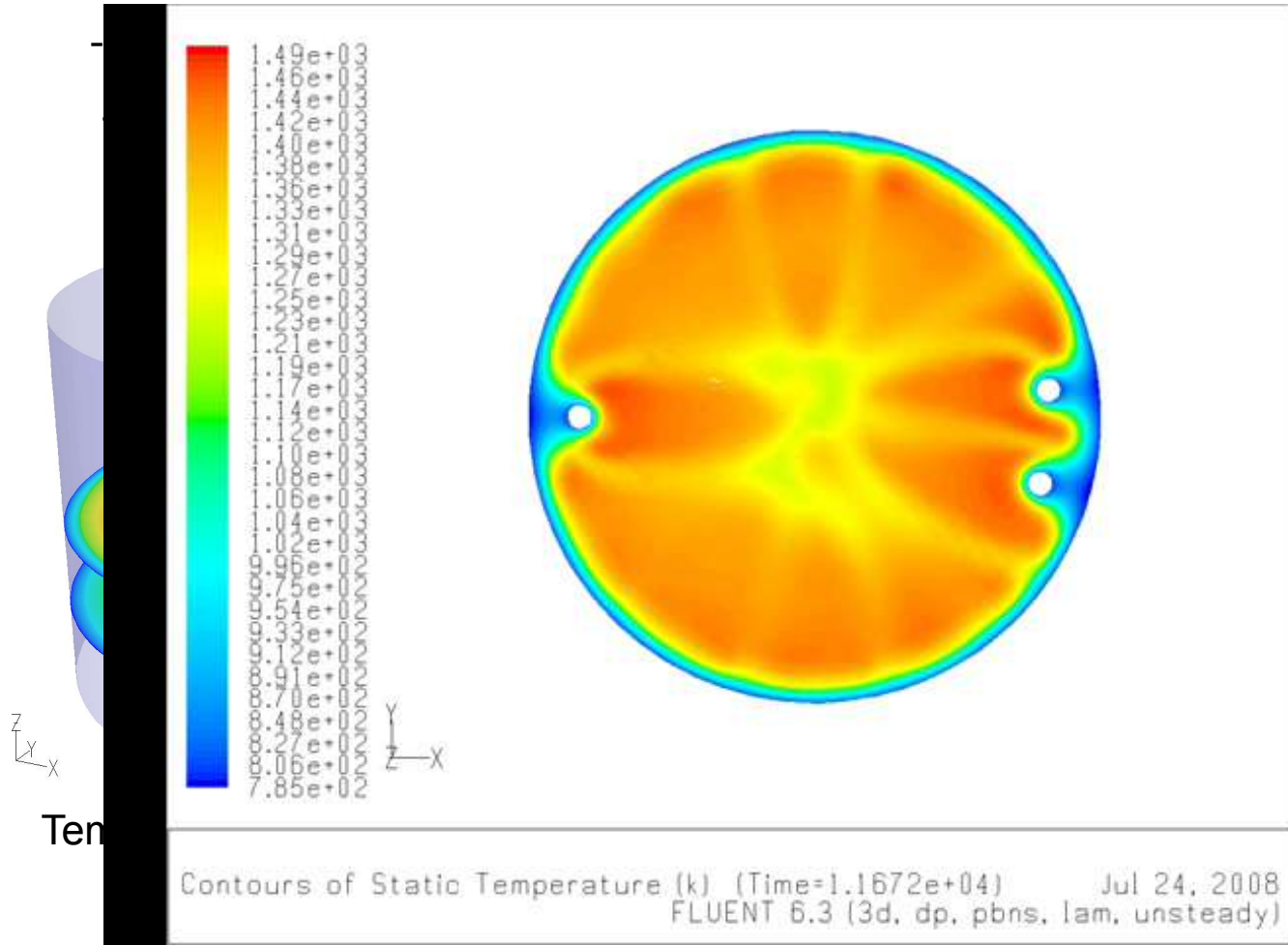


- Cellules dépendantes du temps

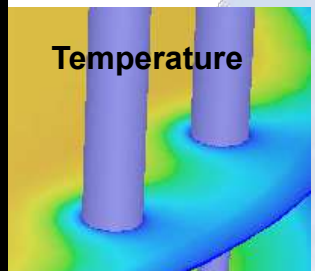


→ Le couplage 3D-3D est nécessaire dans ce cas pour simuler correctement l'instabilité thermoconvective

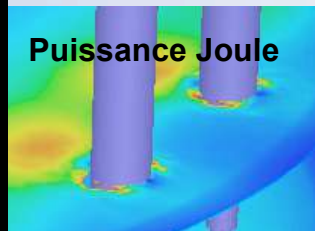
Deuxième cas d'étude de cuve sans agitation



Canne de mesure de température



Temperature



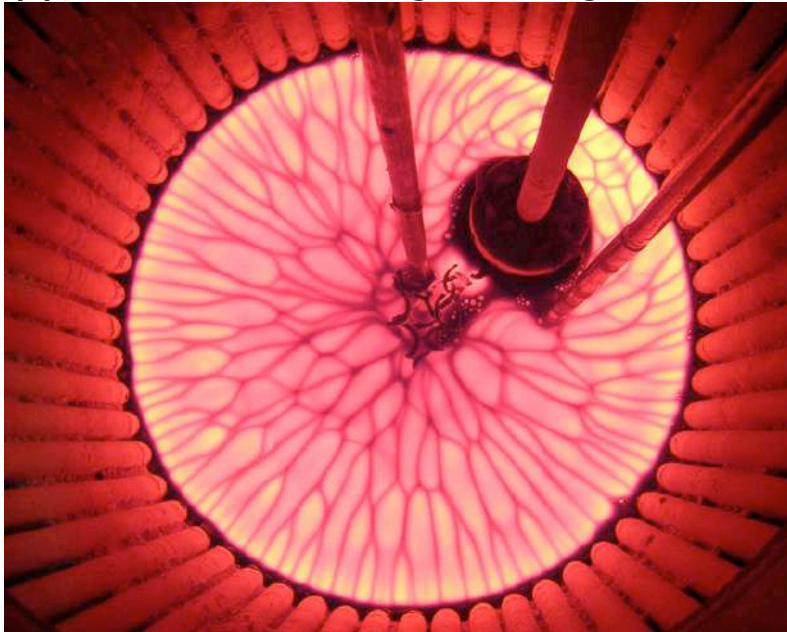
Puissance Joule



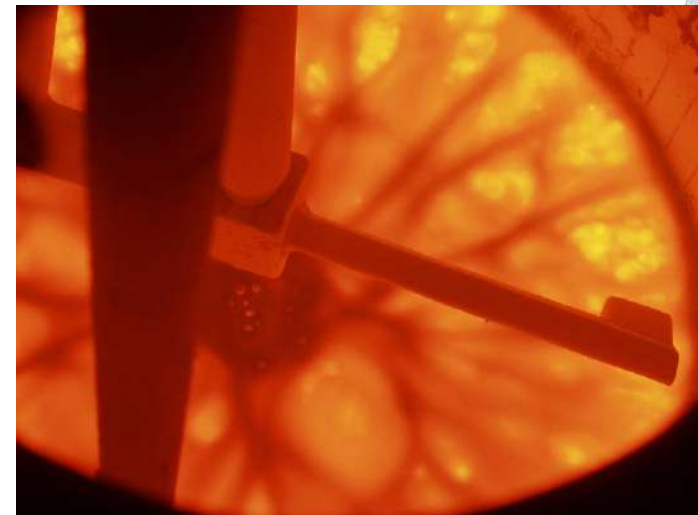
- Observation expérimentale
 - Convection Marangoni est responsable de l'écoulement en surface libre.

Sugilal, G. (India)

Applied Thermal Engineering, 2008, 28



CEA Marcoule

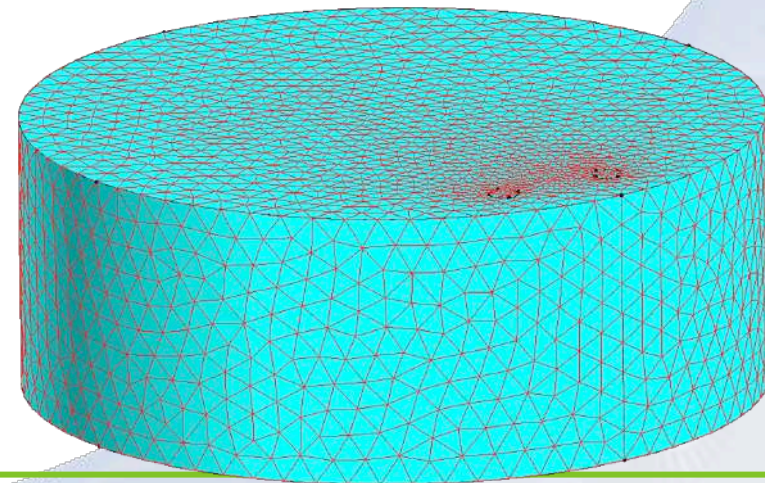
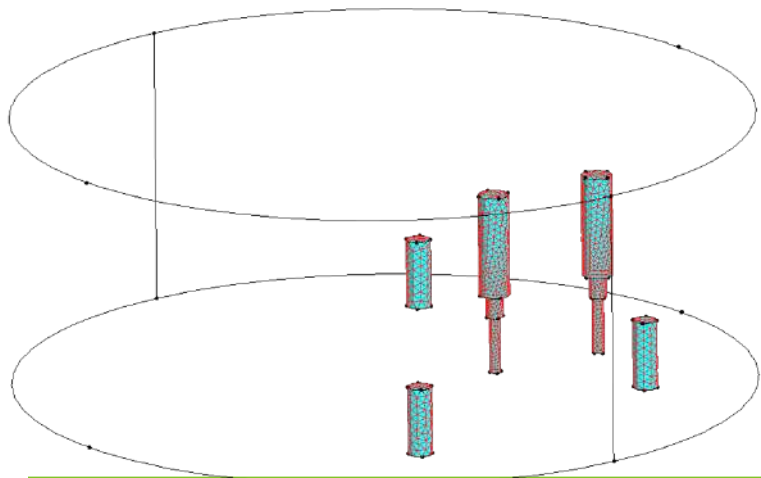
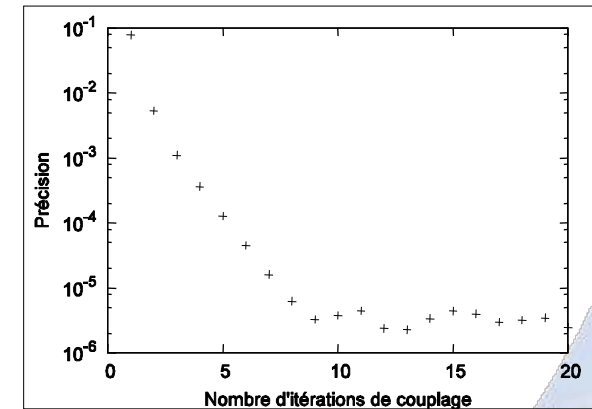


Troisième Cas d'étude : avec bullage



- Niveau de verre bas (240 mm)
- Sans agitation mécanique
- Avec et sans brassage par bullage
 - Trajectoires des trains de bulles verticales
- Puissance Joule injectée totale de 70 kW

Convergence du couplage itératif entre Fluent et Flux

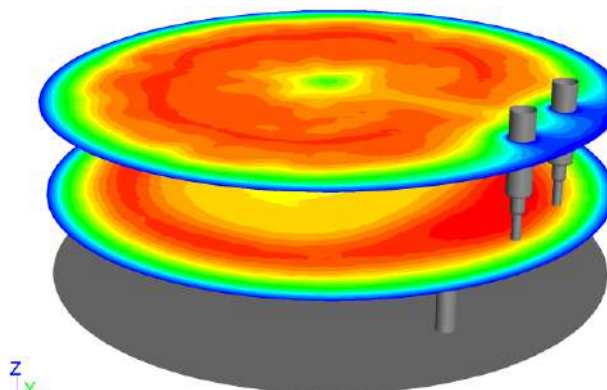


Puissance Joule totale de 70 kW

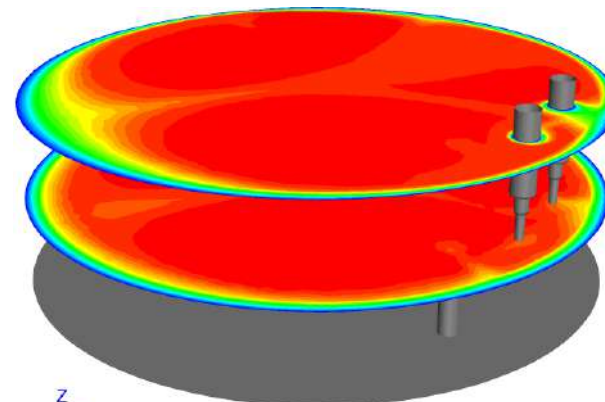
Sans brassage par bullage

Avec brassage par bullage

Température

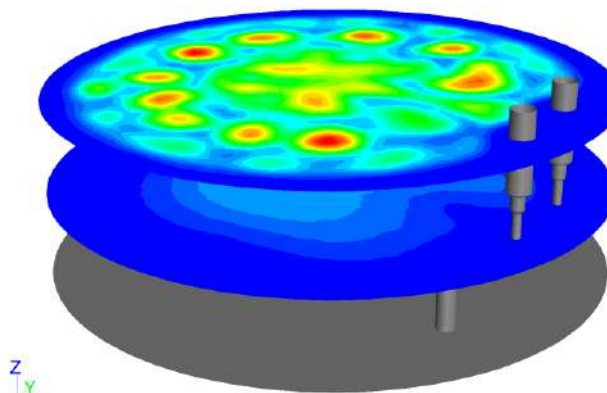


$T_{\max} = 1884 \text{ K}$

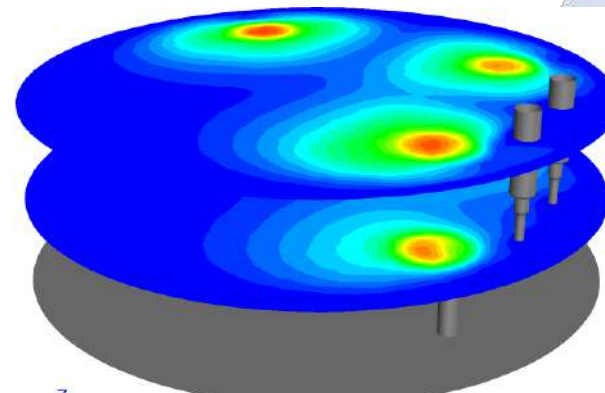


$T_{\max} = 1430 \text{ K}$

Vitesse verticale



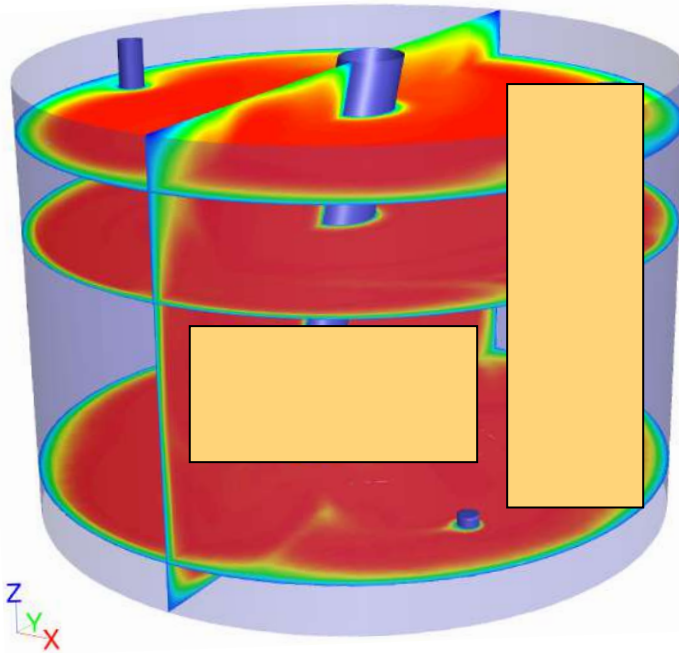
$V_{\max} = 0,002 \text{ m s}^{-1}$



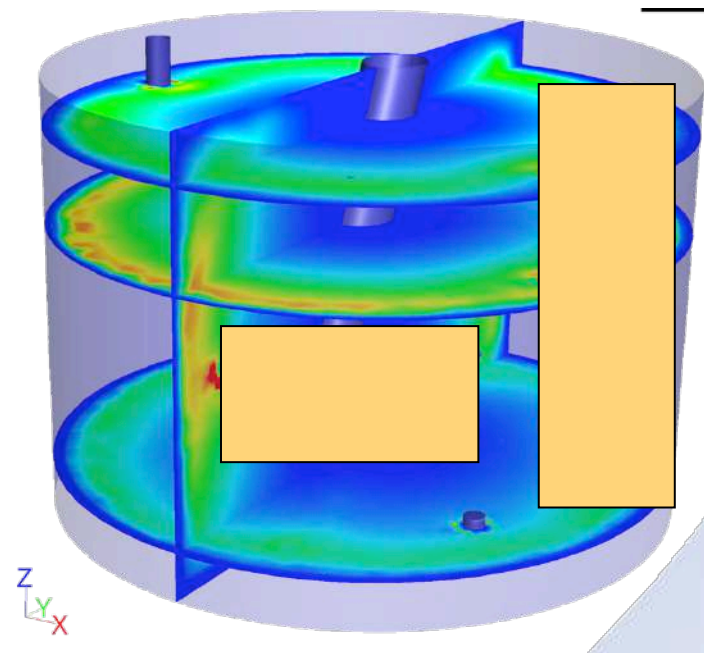
$V_{\max} = 0,2 \text{ m s}^{-1}$



Résultats sur un cas avec agitation mécanique



$$T_{\max} = 1500 \text{ K}$$



$$\text{Puissance Joule}_{\max} = 10^5 \text{ W.m}^{-3}$$

→ Température bien homogène

Accès à toutes les données thermiques

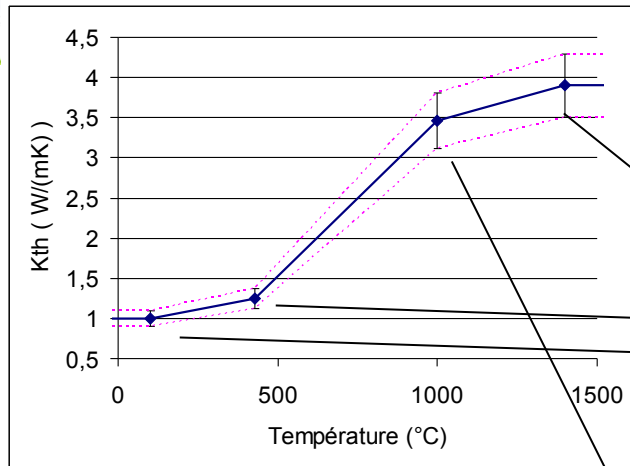
Importance des propriétés physiques



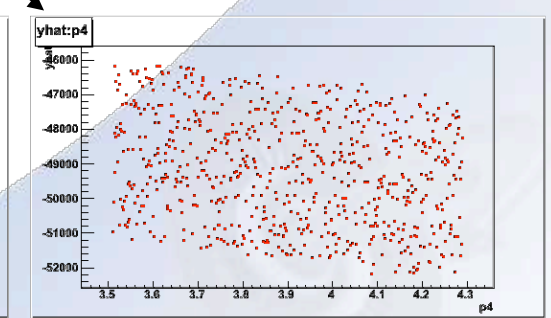
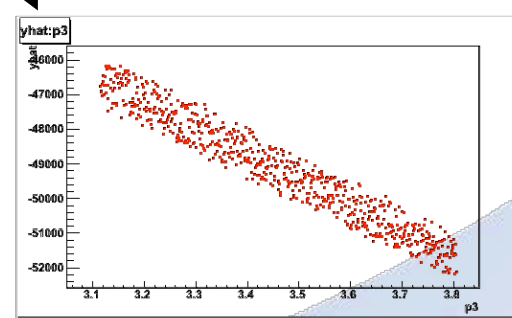
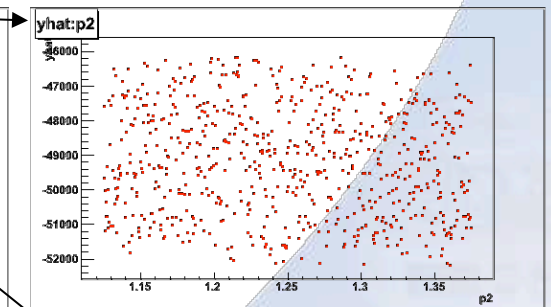
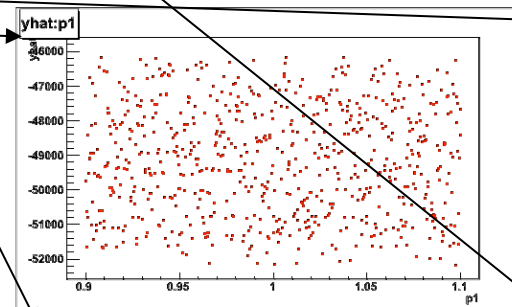
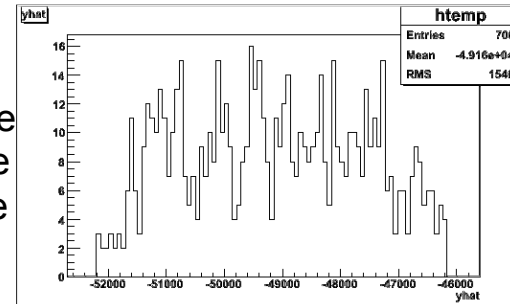
- Bilan des propriétés physiques contribuant à l'écoulement:
 - Masse volumique : convection thermogravitaire
 - Tension de surface : convection thermocapillaire
 - C_p : autocreuset
 - Viscosité : autocreuset
 - Conductivité électrique : chauffage par induction
 - Conductivité thermique : transferts thermique et autocreuset
- La caractérisation sur toute la plage de température est difficile
- Hiérarchisation de l'importance des propriétés physiques par des calculs de propagation d'incertitudes

- Propagation d'incertitudes

- Utilisation du logiciel Uranie (CEA-DM2S) pour la propagation d'incertitude



Puissance thermique échangée



→ Couplage du logiciel Uranie avec les simulations Fluent

→ Propagation des incertitudes issues des lois de propriétés physiques

→ Permet de savoir quelles propriétés sont importantes pour guider les efforts de caractérisation



- Conclusion

- La simulation numérique des procédé de vitrification prend en compte de nombreux effets couplés
- Des points de validation ont été réalisés
- Les projets de nouveaux procédés bénéficient tous d'une aide de la simulation

- Des efforts sont à fournir pour améliorer certains point de validation et pouvoir simuler des verres spéciaux
 - Viscosité : comportement rhéologique marqué de certain verre
 - Conductivité thermique : certain verres sont semi-transparent et non plus opaque
 - Conductivité électrique : partie imaginaire de la conductivité à prendre en compte (permittivité diélectrique)

- Besoin de caractérisation des matrices sur toute la gamme de températures rencontrée pour :
 - » Viscosité
 - » Conductivité Electrique
 - » Conductivité Thermique
 - » Tension de surface
 - » Emissivité
 - » Capacité calorifique
 - » Masse volumique



- Merci de votre attention

Annexe

- Propagation d'incertitudes

- Modèles statistiques pour l'étude de sensibilité aux paramètres procédés : Logiciel Uranie (CEA-DM2S) pour la propagation d'incertitude

Pour 20% d'incertitude sur :

Erreur en %	Densité	Kth	Cp	Viscosité
Flux thermique	9	12	6	5
Épaisseur autocreuset	10	13	7	5

II. MODÉLISATION DU BULLAGE

Modèle à « une maille »

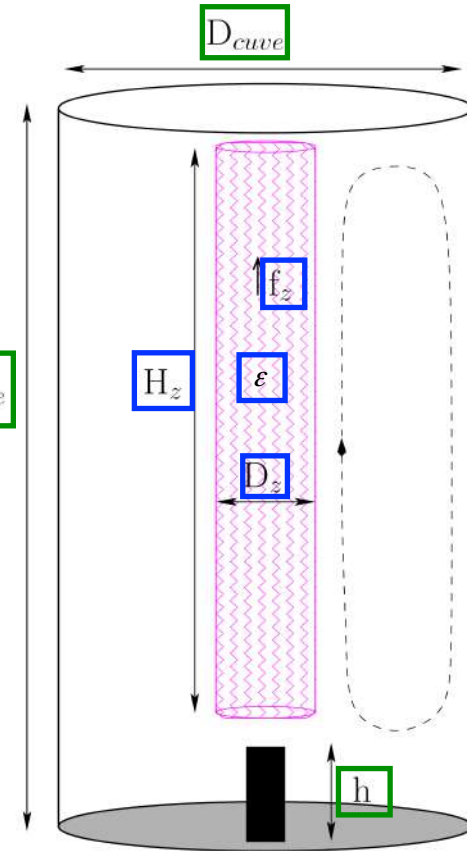
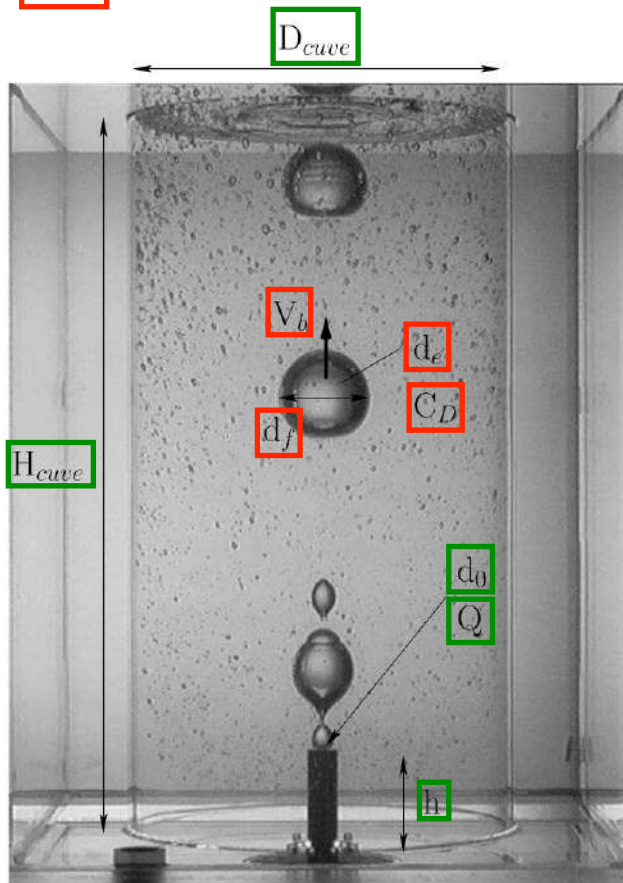
 Paramètres physiques connus



 Paramètres physiques caractérisant le bullage

 Paramètres d'entrée du modèle numérique

Contexte
Bullage
Couplage
Perspective



$\rho_L \mu_L \rho_G \mu_G \sigma \frac{1}{g}$

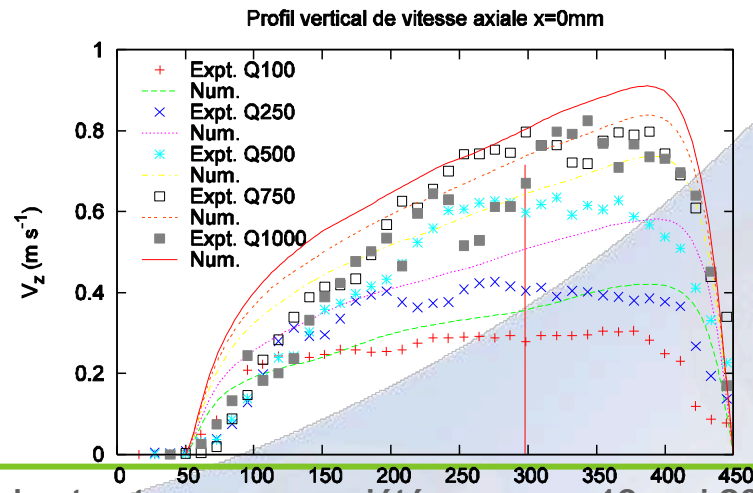
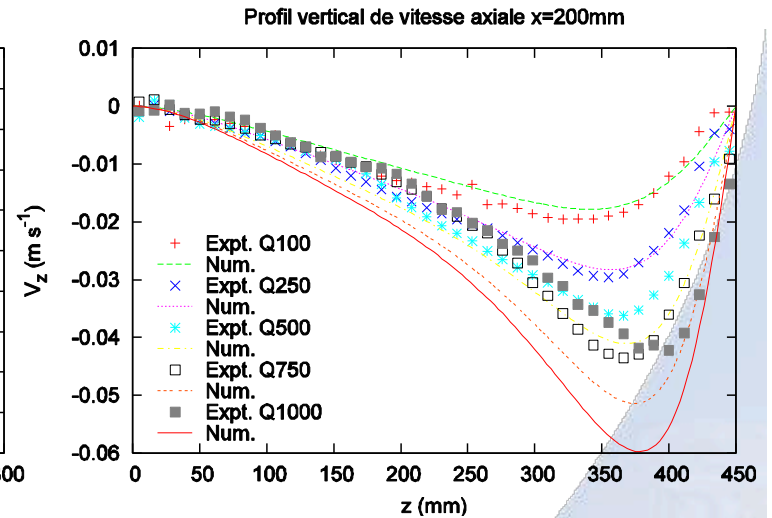
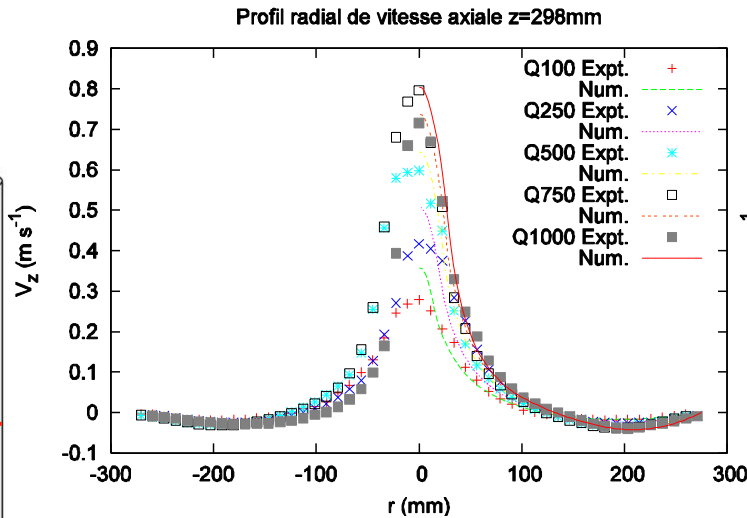
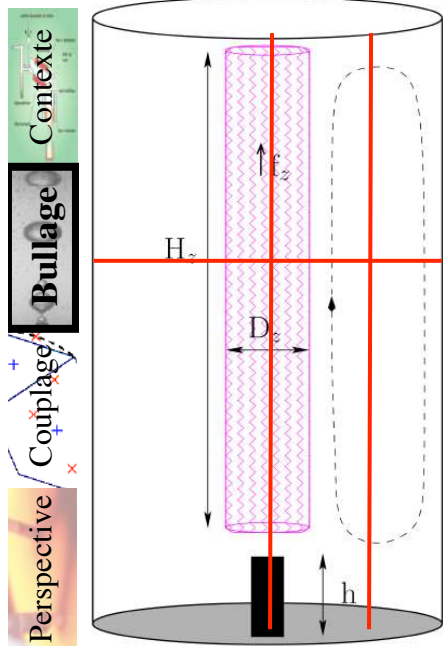
$\rho_L \mu_L$

II. MODÉLISATION DU BULLAGE

Modèle de **Snabre et al.** : $f_z = \rho g \varepsilon$ $r_z = \frac{d_e}{2}$ $\varepsilon = f(v_b, C_d, \varepsilon)$ $Cd = 1 + \frac{16}{Re}$

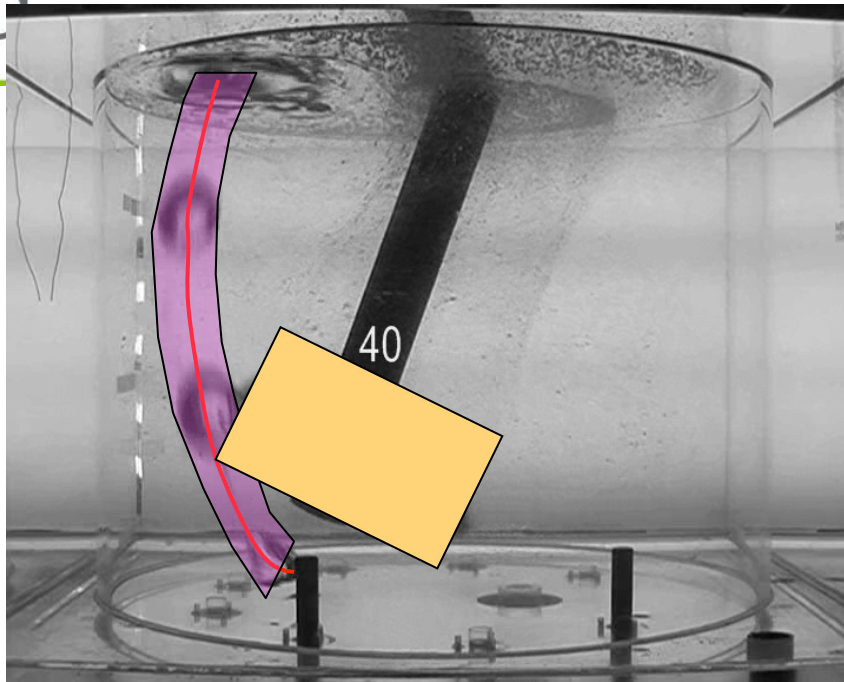


$\nu = 1840 \text{ cSt}$



II. MODÉLISATION DU BULLAGE

Interaction agitation mécanique / bullage



Modèle de trajectoire

- Hypothèse de stationnarité des trajectoires

1^{er} temps :

Calcul de la trajectoire du train de bulle

2^{ème} temps :

Mise en place du modèle à une maille le long de cette trajectoire

- Appui d'essais en similitude hydraulique

1 Définition, réalisation et exploitation

2 Validation numérique sans bullage

3 Calcul des trajectoires, comparaison Expt/Num

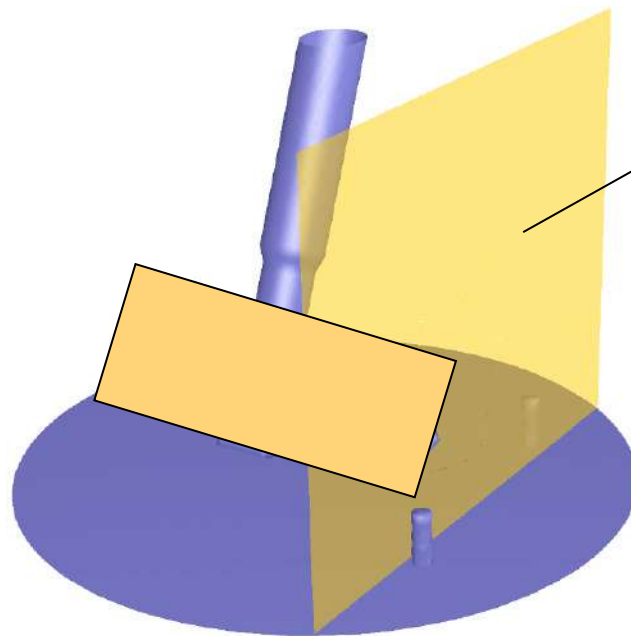
II. MODÉLISATION DU BULLAGE

Calcul des trajectoires



Première étape : calcul de l'écoulement sans bullage

Deuxième étape : calcul de la trajectoire d'une bulle (suivi Lagrangien)



Plan de mesure
par PIV

- Paramètres de simulation
 - Logiciel Fluent[®]
 - $N_{\text{maille}} = 500\,000$
 - $\Delta t \sim 0,01\text{s}$
 - **Maillage glissant**

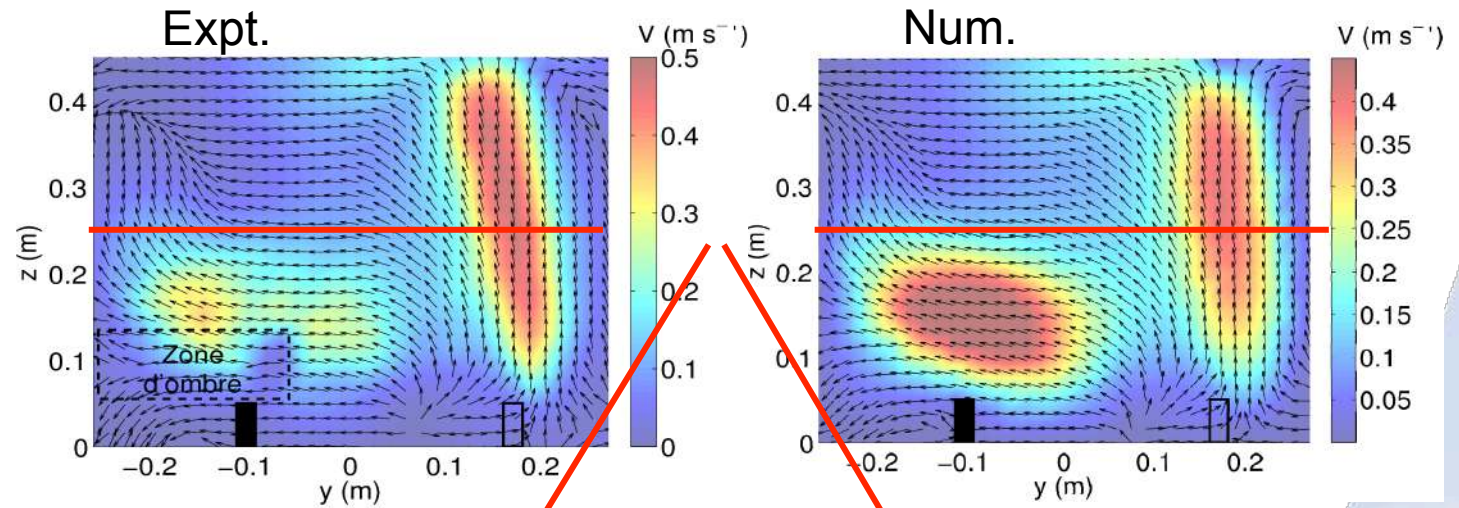
Acquisition puis moyenne des vitesses dans le plan sur un tour complet de pale (Matlab[®])

II. MODÉLISATION DU BULLAGE

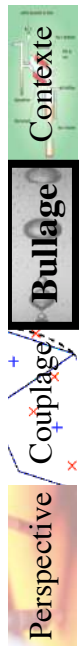
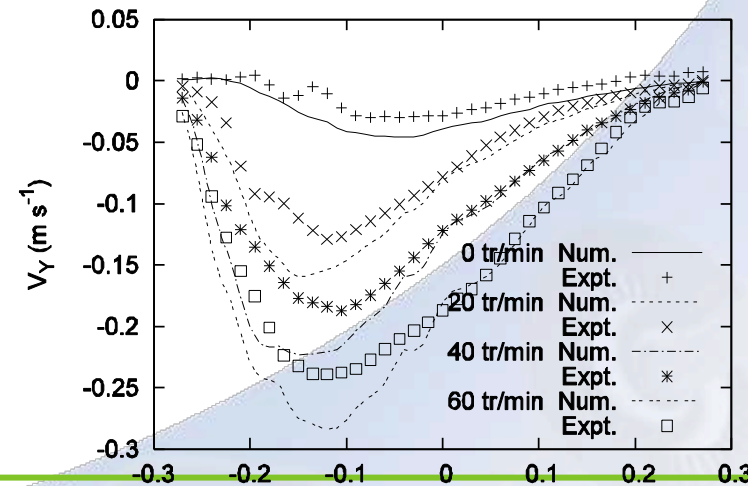
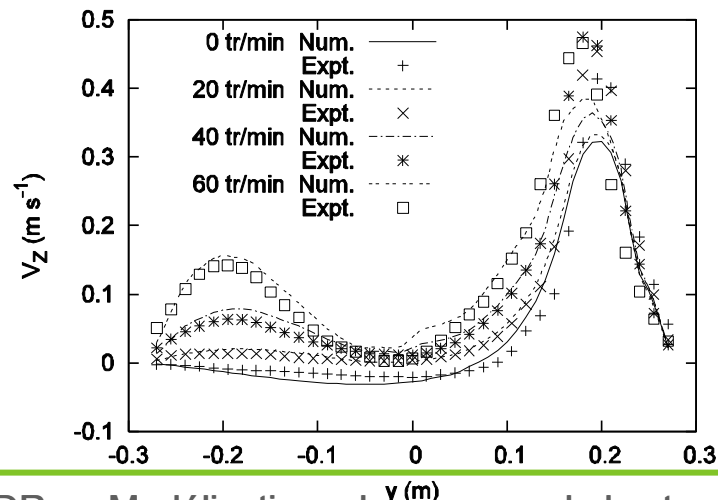
Calcul des trajectoires



Bulleur 1 à 500 NL/h



Z = 221 mm



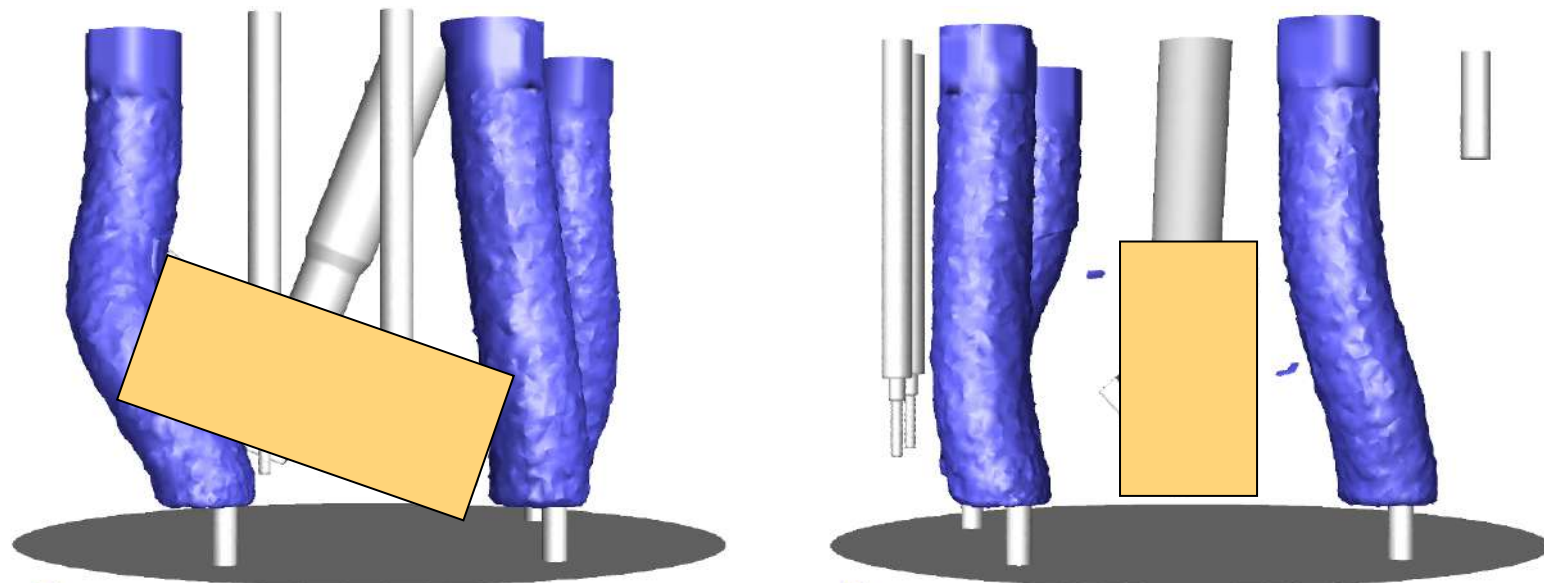
IV. APPLICATIONS

Avec brassage par bullage



Simulation du brassage par bullage :

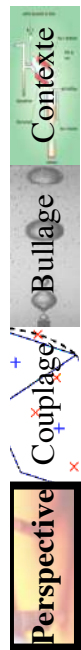
- vitesse de rotation de l'agitateur de 50 tr min^{-1}
- trois zones de forces motrices issues des trois injecteurs d'air



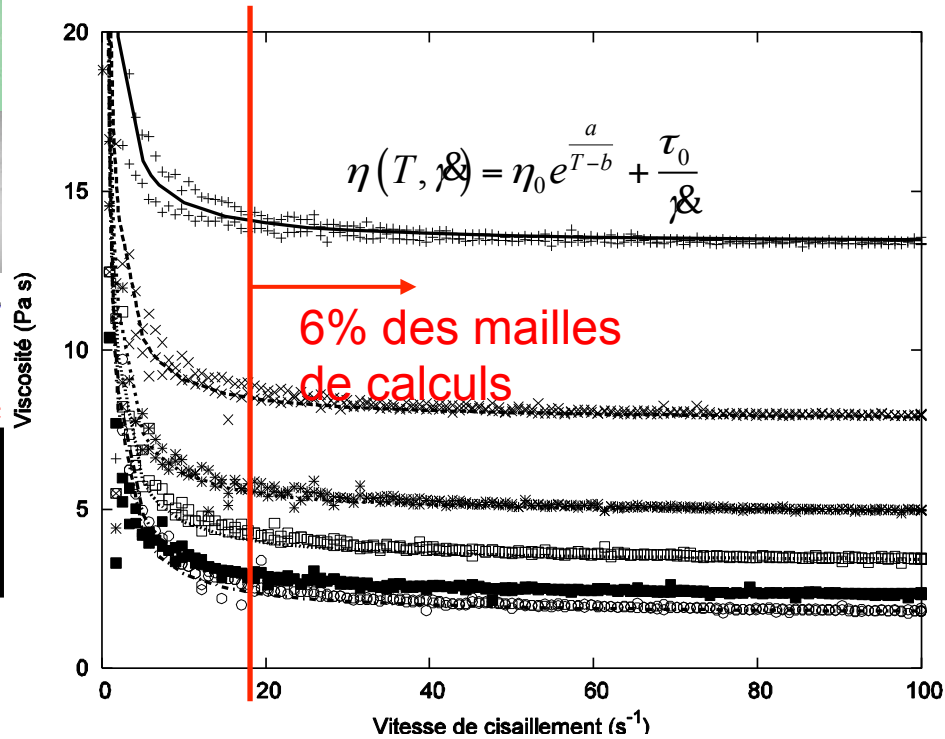
Rhéologie



La viscosité du verre dépend de la vitesse de cisaillement



Donnée pour un verre



- Expt. 1052 +
- 1101,5 x
- 1153 *
- 1199,5 □
- 1254 ■
- 1302 ○
- Mod. 1052 —
- 1101,5 - - -
- 1153
- 1199,5 - - - - -
- 1254 - - - - -
- 1302 - - - - -

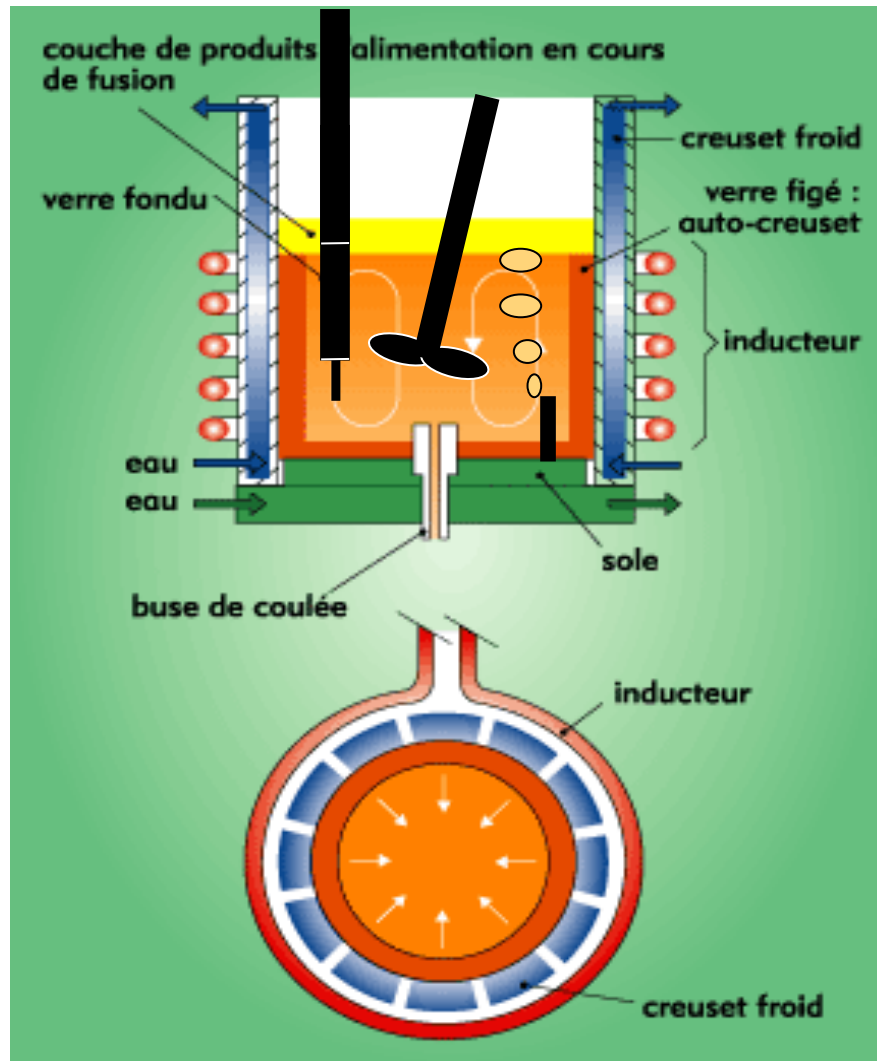
La vitesse de cisaillement moyenne dans le domaine de calcul est de :

$$\dot{\gamma}_{moyen} = 3,7 \text{ s}^{-1}$$

$$\dot{\gamma}_{max} = 150 \text{ s}^{-1}$$

$$\%cellules_{\dot{\gamma}_{max} > 20 \text{ s}^{-1}} = 6\%$$

Creuset Froid



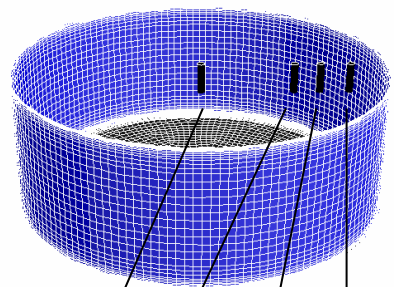
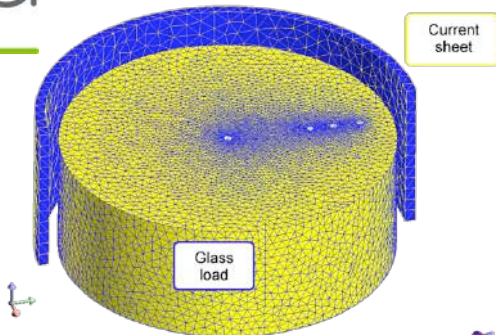
- Diamètre du four : 600 mm
- Température du bain : 1000-2000 °C
- Puissance du générateur : 400 kW
- Fréquence du générateur : 300 kHz

Cas d'étude : cuve sans agitation (Erebus)



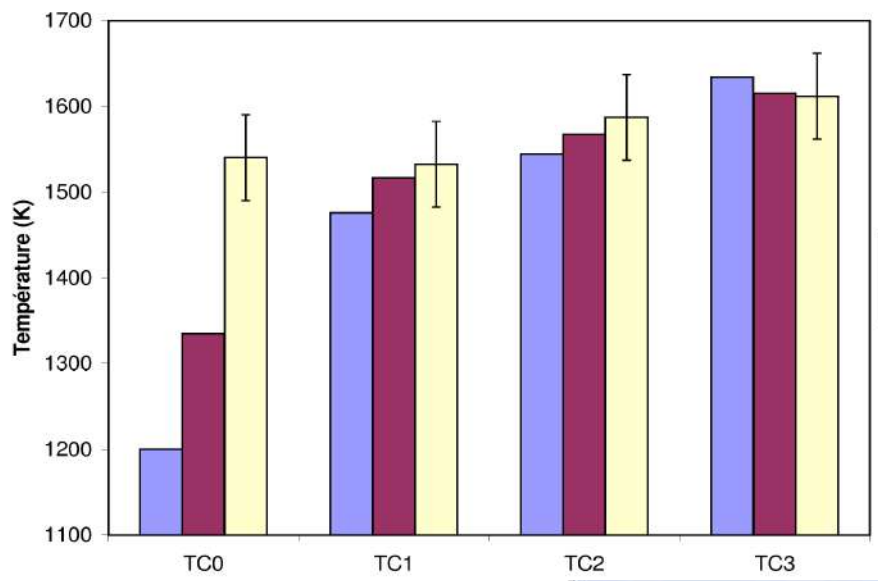
Flux®

Fluent®



Puissance Joule totale injectée : 45 kW

- Contexte
- Bullage
- Couplage
- Perspective

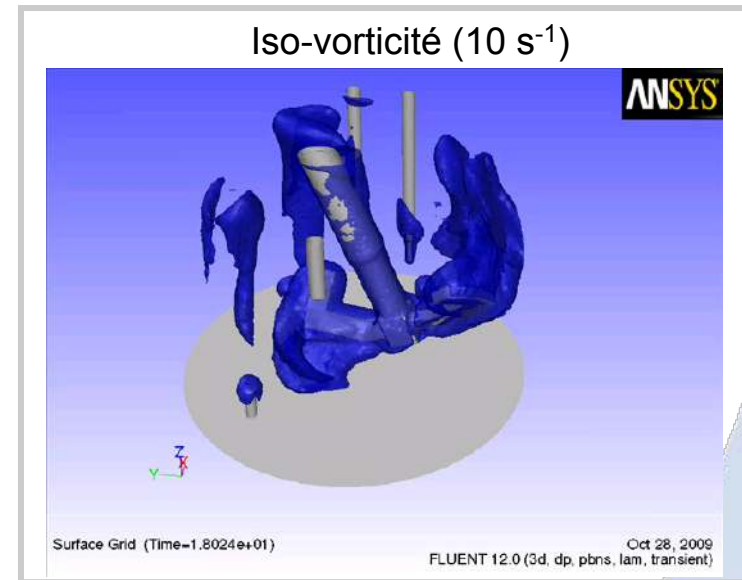


IV. APPLICATIONS

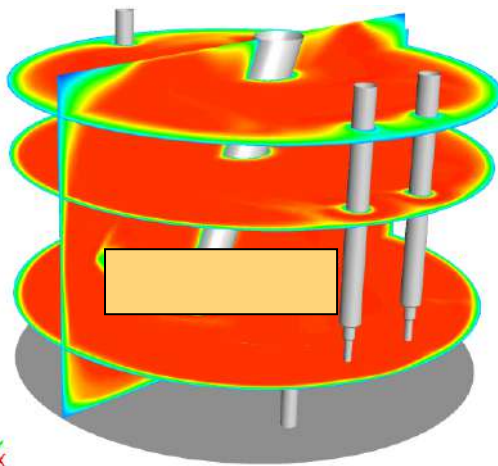
Résultats



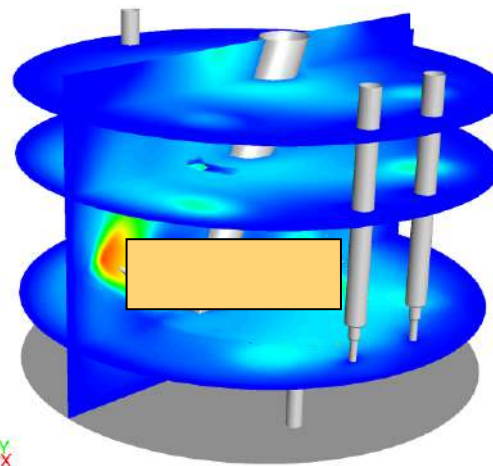
- Température bien homogène
- L'agitation mécanique domine le bullage



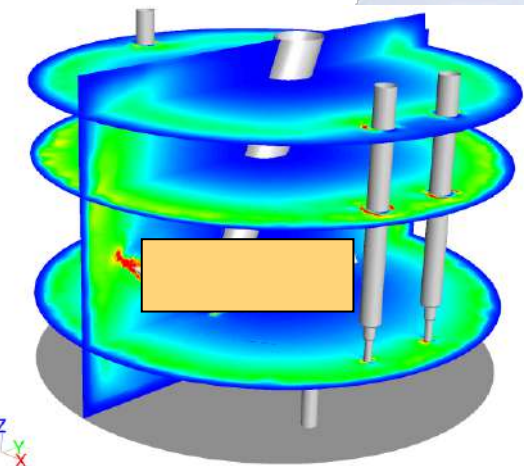
Température



Vitesse



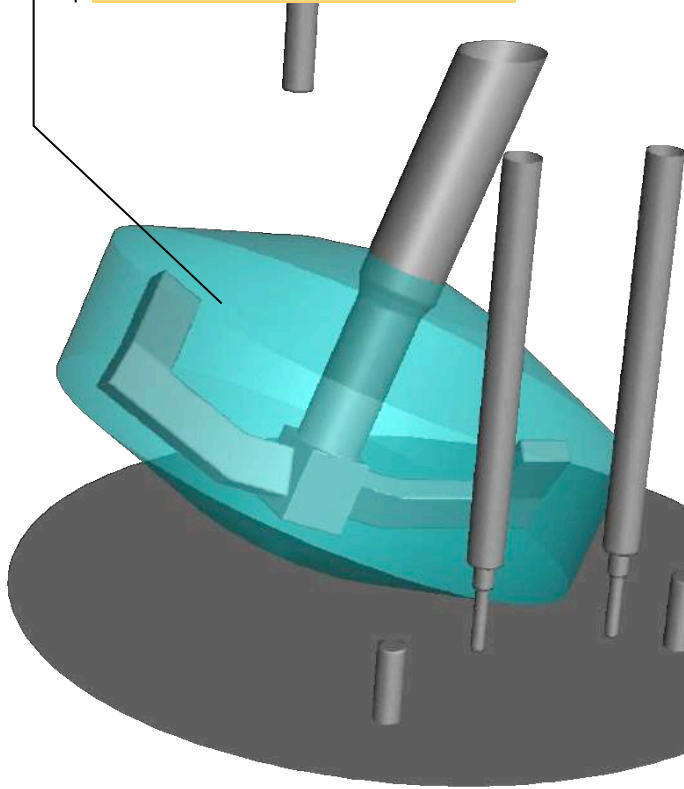
Puissance Joule



Outils numériques



Volume glissant
tournant



Maillage :

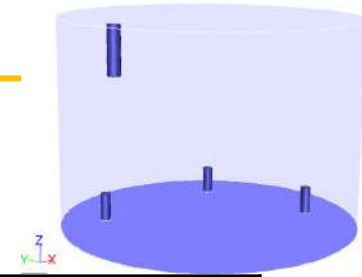
- 2 millions de mailles pour thermique – hydraulique (Fluent®)
- 500 000 éléments pour l' électromagnétisme (Flux ®)

Machine : Station de travail Quad-core 64 bits

Temps de calcul :

- Fluent® : Calculs parallèles sur 8 procs
 - un tour de pale : ~ 1 jour
- Flux ® : Calcul monoprocesseur ~4h
- Transferts entre les deux logiciels : 2 mins

Thermal flux



cea		Heat flux (kW)			
Boundary type	T_{\max} (K)	Crucible	Free surface	Bottom	Thermo-couples
h and T_{∞}	1623	38.1	28.3	4.9	6.9
$T_p = 800\text{K}$	1615	38.9	29.1	3.3	7.6
Experiment	-	65		6	8

→ Very close results (thermal flux as flow configuration) obtained with the two type of thermal boundary conditions

→ Lower thermal gradient with the imposed temperature method :

Less numerical diffusion

Faster convergence