



HAL
open science

SIMULATION NUMERIQUE DES ECOULEMENTS DIPHASIQUES DANS LES ECHANGEURS

Marc Grandotto

► **To cite this version:**

Marc Grandotto. SIMULATION NUMERIQUE DES ECOULEMENTS DIPHASIQUES DANS LES ECHANGEURS. Dynamique des Fluides [physics.flu-dyn]. Université de la Méditerranée - Aix-Marseille II, 2006. tel-00275746

HAL Id: tel-00275746

<https://theses.hal.science/tel-00275746>

Submitted on 25 Apr 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

La simulation numérique des écoulements diphasiques dans les échangeurs

Marc GRANDOTTO-BIETTOLI

Soutenance HDR, Université de la Méditerranée
(Aix-Marseille II)



SOMMAIRE



- Le contexte
- Le projet GENEPI
- Le projet NEPTUNE



Le contexte

- Les domaines concernés
- Les échangeurs : les générateurs de vapeur
- Les écoulements diphasiques
- La simulation numérique

Le projet GENEPI

Le projet NEPTUNE

Le contexte



Les domaines concernés

Le sujet présente trois caractéristiques principales :

- Les échangeurs
- Les écoulements diphasiques
- La simulation numérique

Le contexte

● Les domaines concernés

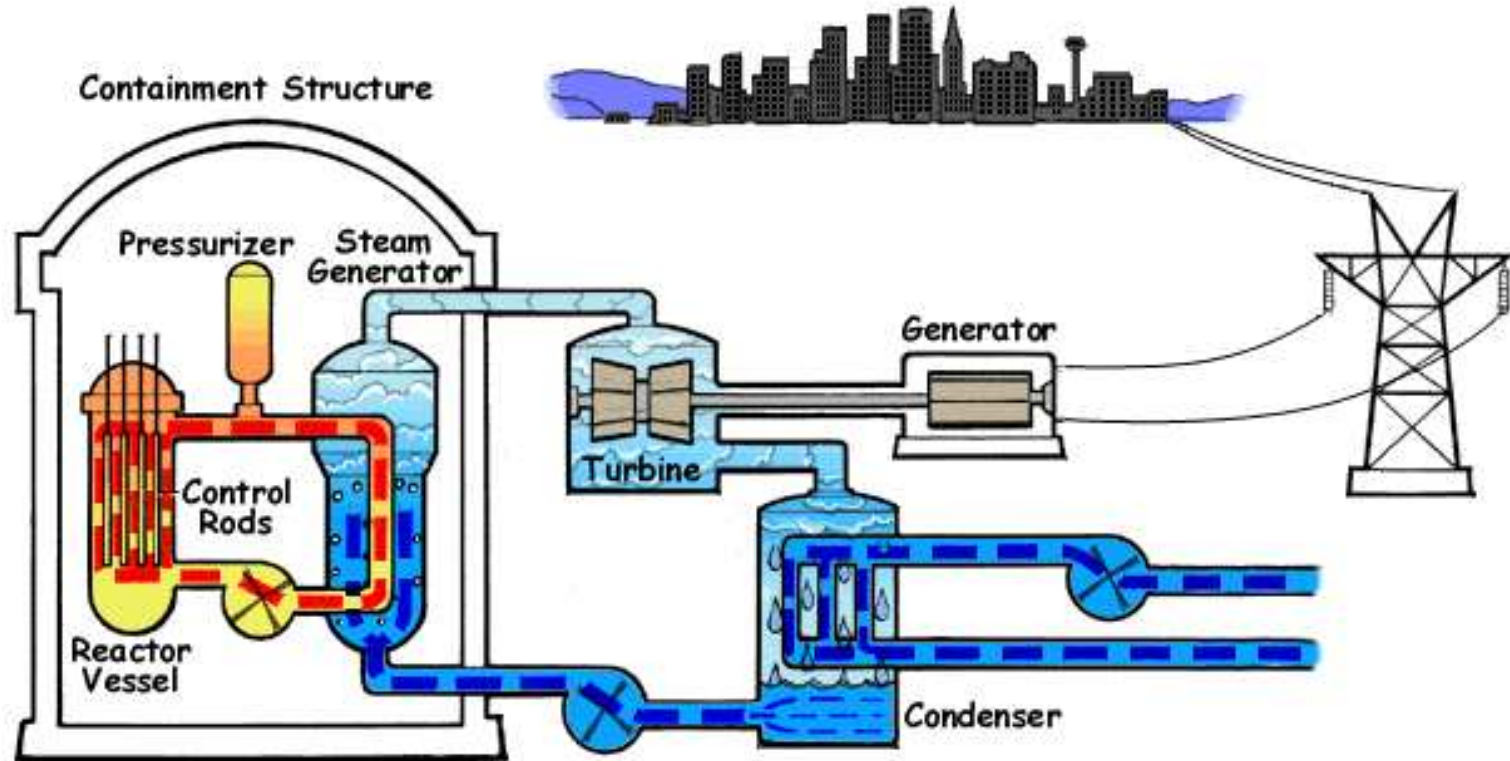
- Les échangeurs : les générateurs de vapeur
- Les écoulements diphasiques
- La simulation numérique

Le projet GENEPI

Le projet NEPTUNE

Les échangeurs : les générateurs de vapeur

■ Principe de fonctionnement



Le contexte

- Les domaines concernés
- Les échangeurs : les générateurs de vapeur
- Les écoulements diphasiques
- La simulation numérique

Le projet GENEPI

Le projet NEPTUNE

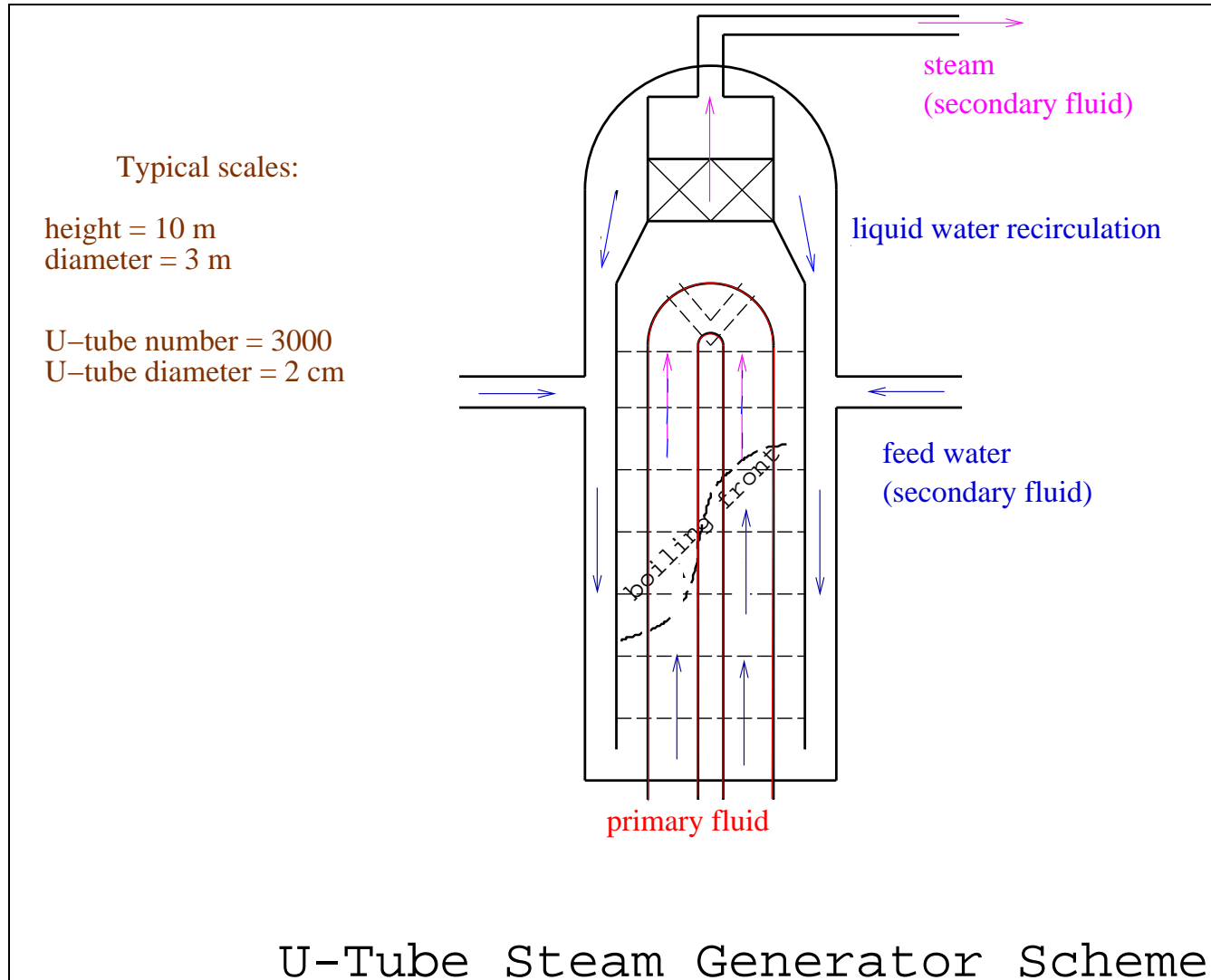
Les échangeurs : les générateurs de vapeur

Le contexte

- Les domaines concernés
- Les échangeurs : les générateurs de vapeur
- Les écoulements diphasiques
- La simulation numérique

Le projet GENEPI

Le projet NEPTUNE



Les échangeurs : les générateurs de vapeur

- Le prix : 25 millions d'euros (environ)
- Les dimensions : hauteur 10 m (évaporateur), diamètre 3 m
- Il contient 3000 tubes en U maintenus par des plaques et des barres anti-vibratoires
- Problème majeur : perte de l'intégrité des tubes, franchissement d'une barrière de sécurité nucléaire
 - ◆ vibration - interaction fluide-structure
 - ◆ encrassement
- Remèdes : bouchage des tubes, puis remplacement du GV
- Les remplacements : aux USA 117 GV ont été remplacés en 20 ans, il est prévu d'en remplacer 36 d'ici 2012
- Complexité géométrique \Rightarrow homogénéisation des structures

Le contexte

- Les domaines concernés
- Les échangeurs : les générateurs de vapeur
- Les écoulements diphasiques
- La simulation numérique

Le projet GENEPI

Le projet NEPTUNE

Les écoulements diphasiques

- Ecoulement tridimensionnel d'un liquide et de sa vapeur
- Transferts interfaciaux de quantité de mouvement, de masse et d'énergie
- Modèle physique de base : les 6 équations de conservation des deux phases
- Manque de connaissance sur la modélisation des transferts dans le contexte du GV :
 - ◆ les structures internes modifient la topologie de l'écoulement diphasique (taille des bulles, turbulence)
 - ◆ la qualité de l'eau modifie les transferts interfaciaux

Le contexte

- Les domaines concernés
- Les échangeurs : les générateurs de vapeur
- Les écoulements diphasiques
- La simulation numérique

Le projet GENEPI

Le projet NEPTUNE

Les écoulements diphasiques

- Modèle simplifié :
 - ◆ les 3 équations de conservation du mélange liquide-vapeur
 - ◆ prise en compte du déséquilibre cinématique (vitesse liquide \neq vitesse gaz)
 - ◆ prise en compte du déséquilibre thermique (essentiellement pour l'ébullition sous saturée)
 - ◆ utilisation de nombreuses corrélations issues de l'expérience
- Limitation de la prise en compte du déséquilibre cinématique \Rightarrow modèle à deux équations de quantité de mouvement (*M. Grandotto, P. Obry, Nuclear Science and Engineering, vol. 151, number 3, November 2005, pp 313-318*)
- Retour vers la modélisation à 6 équations : projet Neptune

Le contexte

- Les domaines concernés
- Les échangeurs : les générateurs de vapeur
- Les écoulements diphasiques
- La simulation numérique

Le projet GENEPI

Le projet NEPTUNE

La simulation numérique

Le contexte

- Les domaines concernés
- Les échangeurs : les générateurs de vapeur
- Les écoulements diphasiques
- La simulation numérique

Le projet GENEPI

Le projet NEPTUNE

- Modélisation tridimensionnelle sans limitation sur la forme des domaines
- Maillages non structurés, approximations par éléments finis (cf. travaux sur les écoulements monophasiques turbulents, thèse A. Autret 1985, *A. Autret, Y. Dekeyser, M. Grandotto, IJNMF, 7, pp. 89-102, 1987*)
- Extension des méthodes “Navier-Stokes” (P.M. Gresho, LLNL), schéma de projection (*M. Grandotto, P. Obry, Revue Européenne des Eléments Finis, Volume 5 - n.1/1996, pp. 53-74*)
- Réduction des temps de calcul (décomposition de domaine, multigrille, parallélisme) (*M. Belliard, M. Grandotto, Nuclear Engineering and Design, 213 (2002) 223-239 - M. Belliard, M. Grandotto, Numerical Heat Transfer, Part A, 43:1-25, 2003*)



La simulation numérique

- Architecture logicielle permettant le développement en équipe
- Orthogonalisation des développements
- Notion de fonctionnalités élémentaires et de typage des données
- Objets, composants logiciels

Le contexte

- Les domaines concernés
- Les échangeurs : les générateurs de vapeur
- Les écoulements diphasiques
- La simulation numérique

Le projet GENEPI

Le projet NEPTUNE



Le projet GENEPI

Le contexte

Le projet GENEPI

- Historique et moyens
- Technologie du GV et homogénéisation
- Le modèle diphasique
- Les fermetures des équations
- Modélisations complémentaires
- Les méthodes numériques
- Optimisation
- Industrialisation

Le projet NEPTUNE



Historique et moyens

- 1986 : décision, constitution de l'équipe, spécifications
- 1987-2001 : développements, validations
- 1990 : soutien de Framatome
- à partir de 2002 : intégré dans le projet Neptune
- juin 2002 : adopté comme référence industrielle par Framatome-ANP (→ Areva NP)
- Moyens : 5 h.an
 - ◆ génie logiciel
 - ◆ analyse numérique
 - ◆ physique des écoulements diphasiques
 - ◆ technologie du GV
- + une plate forme expérimentale de validation : Clotaire

Le contexte

Le projet GENEPI

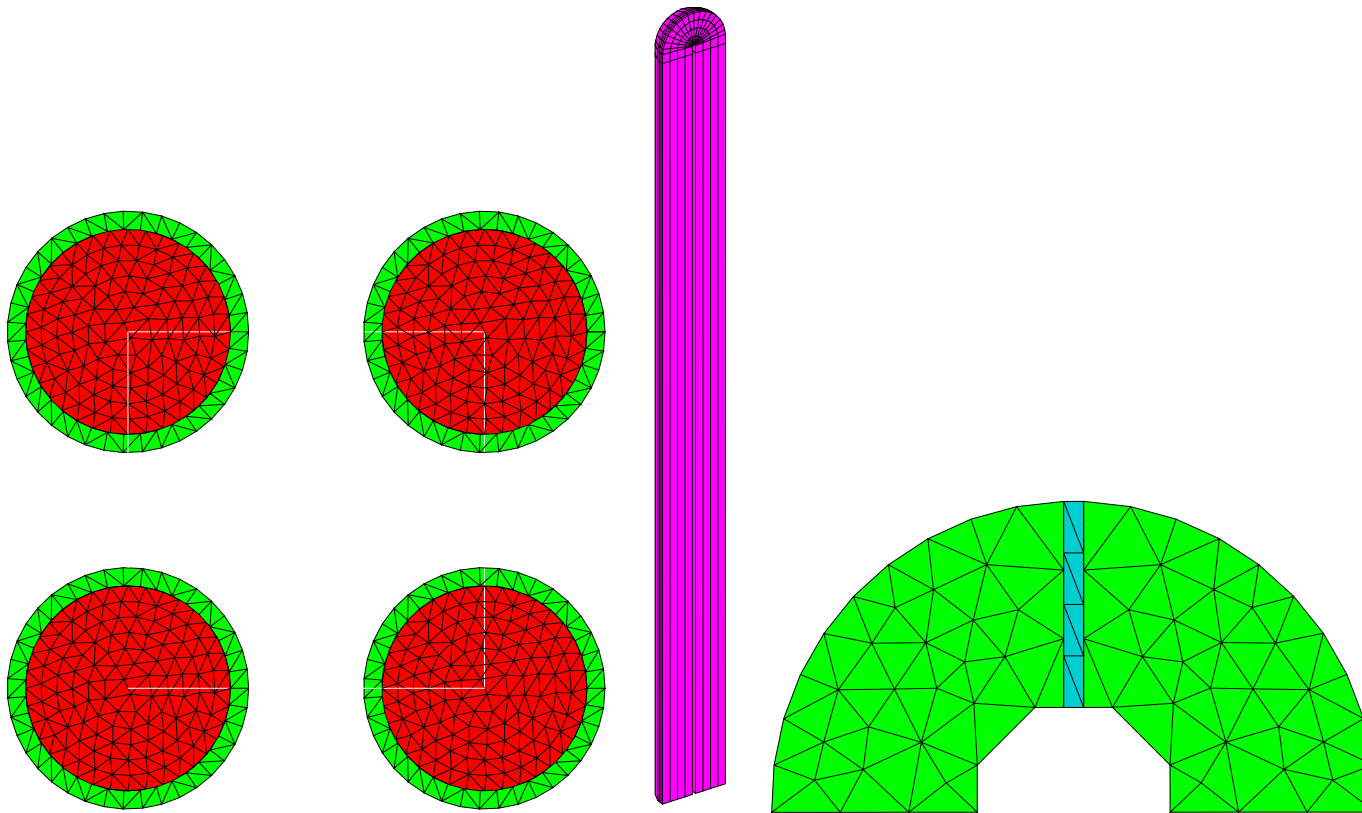
● Historique et moyens

- Technologie du GV et homogénéisation
- Le modèle diphasique
- Les fermetures des équations
- Modélisations complémentaires
- Les méthodes numériques
- Optimisation
- Industrialisation

Le projet NEPTUNE

Technologie du GV et homogénéisation

- Porosité : $\beta = \frac{Volume_fluide}{Volume_total}$
- Génération automatique de formes complexes maillées (faisceaux et plaques)



Le contexte

Le projet GENEPI

● Historique et moyens

● Technologie du GV et homogénéisation

● Le modèle diphasique

● Les fermetures des équations

● Modélisations complémentaires

● Les méthodes numériques

● Optimisation

● Industrialisation

Le projet NEPTUNE

Technologie du GV et homogénéisation

- Utilisation des éléments finis pour les opérations géométriques
- Processus d'interpolation 3D/3D (faisceaux) et 2D/3D (plaques)
- Calcul de tous les paramètres géométriques associés aux structures homogénéisées nécessaires à la résolution des équations du problème
- Méthodes ré-utilisées dans le projet Salomé (plate forme de couplage) : composant Interpolation

Le contexte

Le projet GENEPI

- Historique et moyens
- Technologie du GV et homogénéisation
- Le modèle diphasique
- Les fermetures des équations
- Modélisations complémentaires
- Les méthodes numériques
- Optimisation
- Industrialisation

Le projet NEPTUNE

Le modèle diphasique

(écoulement coté secondaire du GV)

1. conservation de la masse

$$\beta \partial_t \rho + \vec{\nabla} \cdot (\beta \rho \vec{V}) = 0$$

2. conservation de la quantité de mouvement

$$\begin{aligned} & \beta \rho \partial_t \vec{V} + \beta \rho (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V} + \text{div}(\beta x(1-x) \rho \vec{V}_R \otimes \vec{V}_R) \\ & = \beta \rho \vec{g} - \beta \bar{\Lambda} \rho \vec{V} - \beta \vec{\nabla} P + \text{div}(\beta \mu_T (\vec{\nabla} \vec{V} + \vec{\nabla}^T \vec{V})) \end{aligned}$$

3. conservation de l'énergie

$$\begin{aligned} & \beta \rho \partial_t h + \beta \rho (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) h + \text{div}(\beta x(1-x) \rho \mathcal{L} \vec{V}_R) \\ & = \tau \gamma_0 h_{eq} (T_P - T_w) + \text{div}(\beta \chi_T \vec{\nabla} h) \end{aligned}$$

Le contexte

Le projet GENEPI

- Historique et moyens
- Technologie du GV et homogénéisation

● Le modèle diphasique

- Les fermetures des équations

- Modélisations complémentaires

- Les méthodes numériques

- Optimisation

- Industrialisation

Le projet NEPTUNE

Les fermetures des équations

1. conservation de l'énergie primaire

$$\rho_P C_P \frac{\partial T_P}{\partial t} + \rho_P C_P (\vec{V}_P \cdot \vec{\text{grad}} T_P) - \text{div}(C_P \chi_{TP} \vec{\text{grad}} T_P) = - \frac{\gamma_0 h_{eq}}{\beta_{P0}} (T_P - T_W)$$

2. tables thermodynamiques $\rightarrow \rho \times \mathcal{L}$

3. corrélations pour le déséquilibre cinématique $\rightarrow \vec{V}_R$

4. corrélations pour l'échange et le déséquilibre thermique $\rightarrow h_{eq} T_W$

5. corrélations pour le frottement sur les structures internes $\rightarrow \bar{\Lambda}$

6. modélisation de la turbulence (Schlichting) $\rightarrow \mu_T \chi_T$

7. Mise en oeuvre tridimensionnelle des corrélations

Le contexte

Le projet GENEPI

- Historique et moyens
- Technologie du GV et homogénéisation
- Le modèle diphasique

● Les fermetures des équations

- Modélisations complémentaires
- Les méthodes numériques
- Optimisation
- Industrialisation

Le projet NEPTUNE

Modélisations complémentaires

- Equation de transport de particules solides : calcul de l'encrassement des GV (\Rightarrow des fermetures pour l'interaction particules - fluide diphasique : sédimentation, probabilité de collage, ré-entraînement, dépôt par ébullition)
- Résolution de la thermique dans les solides adjacents \rightarrow méthodes de couplage
- Deuxième équation de quantité de mouvement pour la phase gazeuse (calcul de \vec{V}_R)

$$\beta\alpha_k\rho_k\partial_t\vec{V}_k + \beta\alpha_k\rho_k(\vec{V}_k\cdot\nabla)\vec{V}_k = \beta\alpha_k\rho_k\vec{g} - \beta\alpha_k\nabla P - \beta\bar{\Lambda}_k\vec{V}_k - \beta\bar{\Lambda}_{Ik}\vec{V}_k + \beta\bar{\Lambda}_{Ik'}\vec{V}_{k'} - a_k(\vec{V}_k - \vec{V}_{k'}) + div(\beta\alpha_k\mu_{Tk}(\nabla\vec{V}_k + \nabla^T\vec{V}_k))$$

Le contexte

Le projet GENEPI

- Historique et moyens
- Technologie du GV et homogénéisation
- Le modèle diphasique
- Les fermetures des équations
- Modélisations complémentaires
- Les méthodes numériques
- Optimisation
- Industrialisation

Le projet NEPTUNE

Les méthodes numériques

- Approximation éléments finis mixtes (vitesse et enthalpie Q1, pression Q0)
- Schéma de projection (calcul vitesse - pression)
Remarque 1 : $\vec{\nabla} \cdot (\beta \rho \vec{V}) = 0$
Remarque 2 : généralisable à $\beta \partial_t \rho + \vec{\nabla} \cdot (\beta \rho \vec{V}) = 0$ pour $\partial_t \rho$ raisonnable
- solveurs itératifs (gradients conjugués)

Le contexte

Le projet GENEPI

- Historique et moyens
- Technologie du GV et homogénéisation
- Le modèle diphasique
- Les fermetures des équations
- Modélisations complémentaires
- Les méthodes numériques
- Optimisation
- Industrialisation

Le projet NEPTUNE



Optimisation

- parallélisation des solveurs (composant logiciel externe)
- Méthodes de décomposition de domaine → parallélisme (exemple : 1 million de mailles sur 32 processeurs) (raccordement conforme ou non, avec ou sans recouvrement, ADN)
- Méthodes de zoom (AMR)
- Méthodes multigrille

Le contexte

Le projet GENEPI

- Historique et moyens
- Technologie du GV et homogénéisation
- Le modèle diphasique
- Les fermetures des équations
- Modélisations complémentaires
- Les méthodes numériques
- Optimisation
- Industrialisation

Le projet NEPTUNE

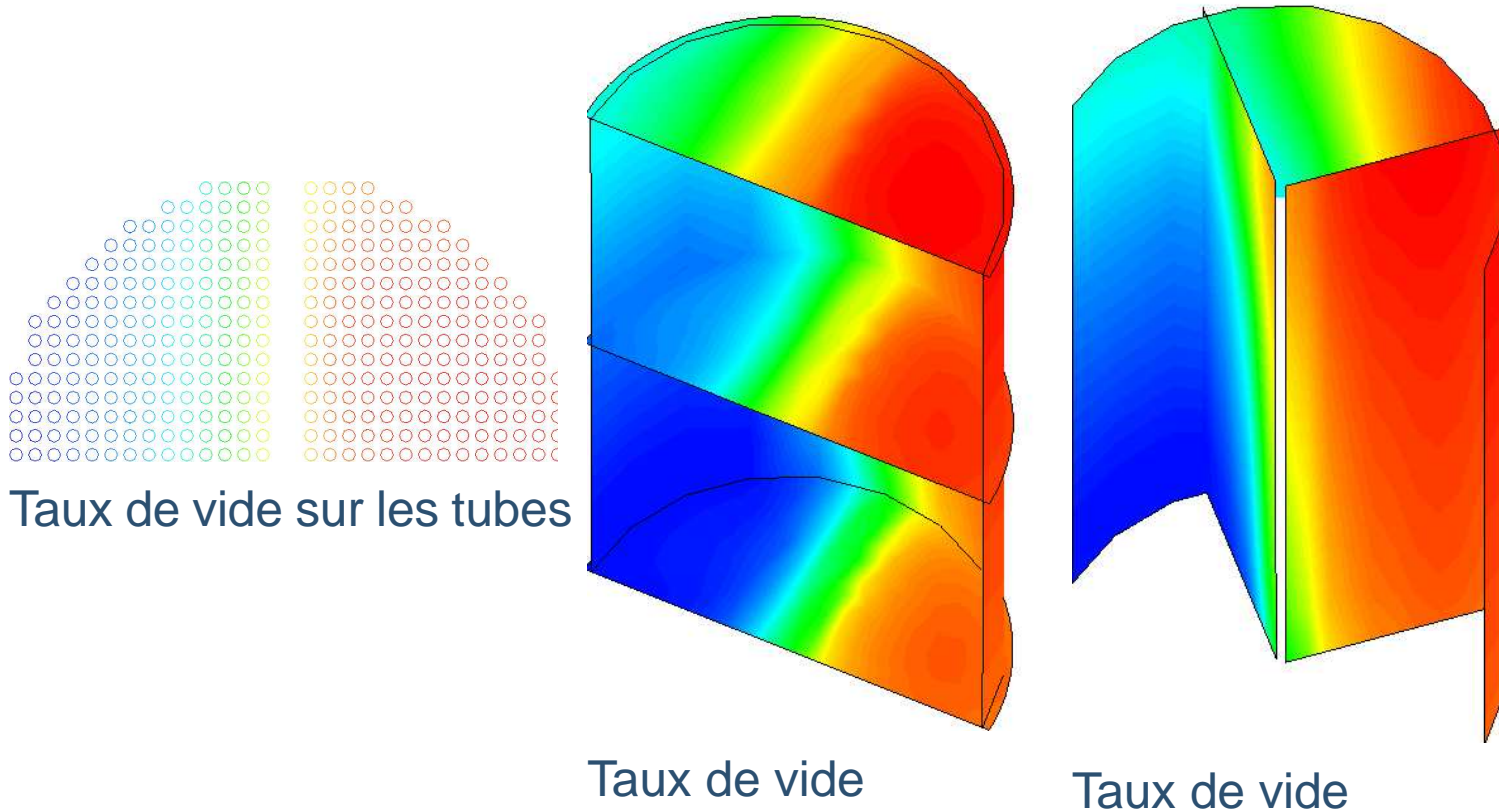
Industrialisation

Le contexte

Le projet GENEPI

- Historique et moyens
- Technologie du GV et homogénéisation
- Le modèle diphasique
- Les fermetures des équations
- Modélisations complémentaires
- Les méthodes numériques
- Optimisation
- Industrialisation

Le projet NEPTUNE





Le contexte

Le projet GENEPI

Le projet NEPTUNE

- Présentation générale
- Architecture générale et composants logiciels
- Autres actions Neptune
- Conclusion

Le projet NEPTUNE



Présentation générale

- Regroupement des moyens de développement CEA et EDF (avec le soutien de Areva NP et de IRSN)
- Plateforme de simulation de toutes les situations où la thermohydraulique diphasique joue un rôle
- Prise en compte de plusieurs échelles de modélisation (simulation directe, échelle locale (mm), échelle homogénéisée (cm), échelle système (dm))
- Couplages multi-échelle et multi-discipline
- Architecture à composants logiciels
- Génépi encapsulé dans Neptune
- Couplage Génépi (ech. homogénéisée) - NeptuneCFD (ech. locale)

Le contexte

Le projet GENEPI

Le projet NEPTUNE

● Présentation générale

- Architecture générale et composants logiciels
- Autres actions Neptune
- Conclusion



Objectifs du lot “architecture générale et composants logiciels”

- assurer la cohérence des développements logiciels
- développer les composants transverses aux différentes échelles
(Mise en données, propriétés des fluides, lois de fermeture)
- assurer les capacités de couplages
- moyens : 5 h.an répartis sur 3 centres CEA et deux centres EDF

Le contexte

Le projet GENEPI

Le projet NEPTUNE

- Présentation générale
- Architecture générale et composants logiciels
- Autres actions Neptune
- Conclusion

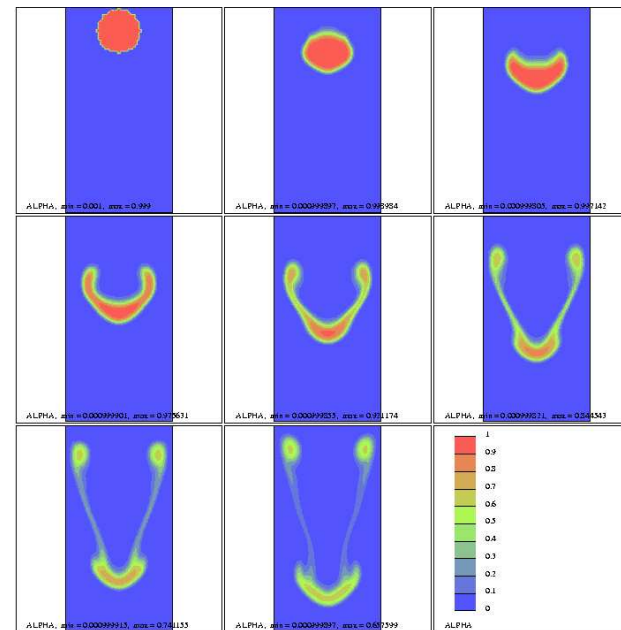
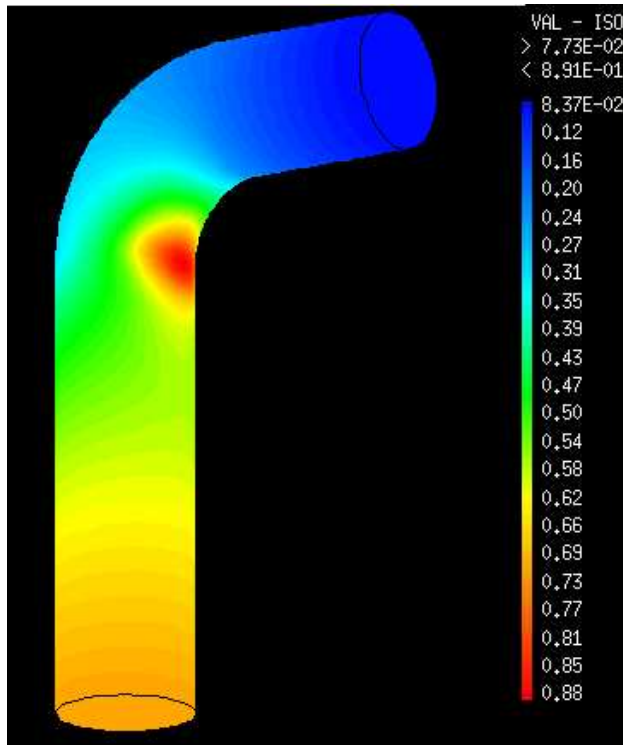
Le contexte

Le projet GENEPI

Le projet NEPTUNE

- Présentation générale
- Architecture générale et composants logiciels
- Autres actions Neptune
- Conclusion

- R&D numérique : thèses sur les modèles hyperboliques à 6 et 7 équations (J. Cortes 1999, , M. Grandotto, J. Cortes, *Int. J. of Computational Fluid Dynamics*, vol. 19, number 4, May 2005, pp 311-319, A. Murrone 2003, M. Labois en cours)



Autres actions Neptune

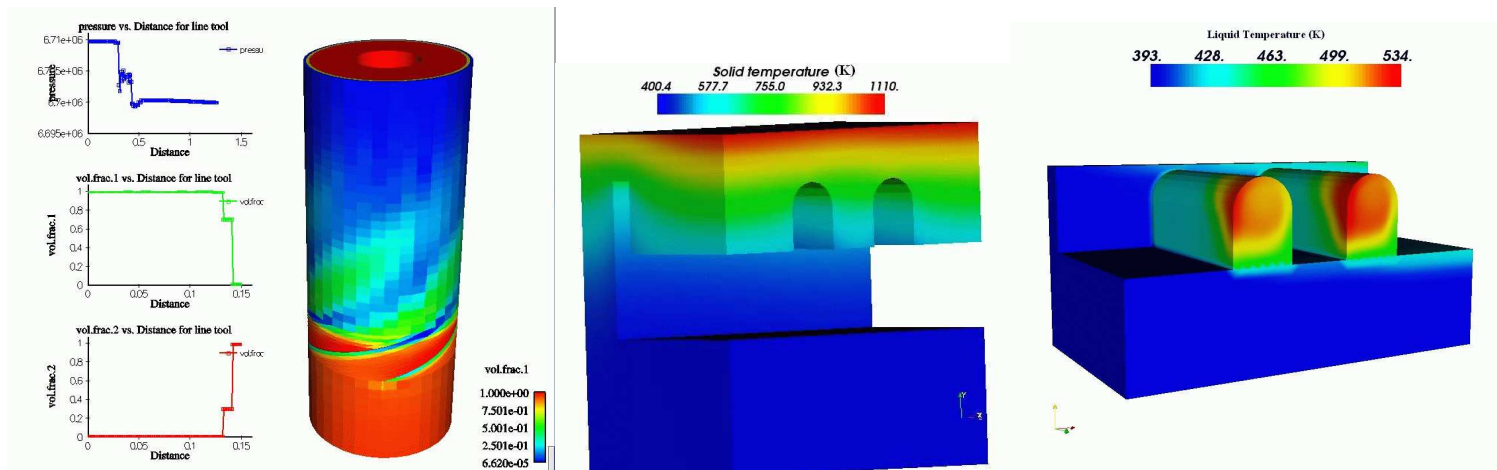
- calculs innovants à l'échelle locale sur des configurations GV
- calculs des systèmes de refroidissement pour ITER
 - ◆ (premières études avec Génépi, en configuration "swirl", thèse de G. Langlais, 1999)
 - ◆ thermohydraulique des hypervapotrons

Le contexte

Le projet GENEPI

Le projet NEPTUNE

- Présentation générale
- Architecture générale et composants logiciels
- **Autres actions Neptune**
- Conclusion





Conclusion

Les voies de progrès possibles :

- la modélisation physico-numérique des écoulements diphasiques
- la turbulence dans les écoulements diphasiques (LES)
- les couplages :
 - ◆ physique : couplage de modèles
 - ◆ numérique : couplage d'algorithmes
 - ◆ informatique : architectures de couplage
- l'interaction fluide-structure
- le parallélisme

Le contexte

Le projet GENEPI

Le projet NEPTUNE

- Présentation générale
- Architecture générale et composants logiciels
- Autres actions Neptune
- Conclusion