

Thermohydraulique des G.V. R.E.P.

Delphine SOUSSAN – Sylviane PASCAL RIBOT

CEA Cadarache DEN/DER/SSTH/LDAL

10 décembre 2009

Plan

Une brève visite du G.V...

Son rôle : assurer le refroidissement du fluide primaire

Le concept économiseur

Modéliser un système de grande taille

Qu'appelle-t'on code COMPOSANT ?

Application 1: particularité des écoulements à travers un faisceau

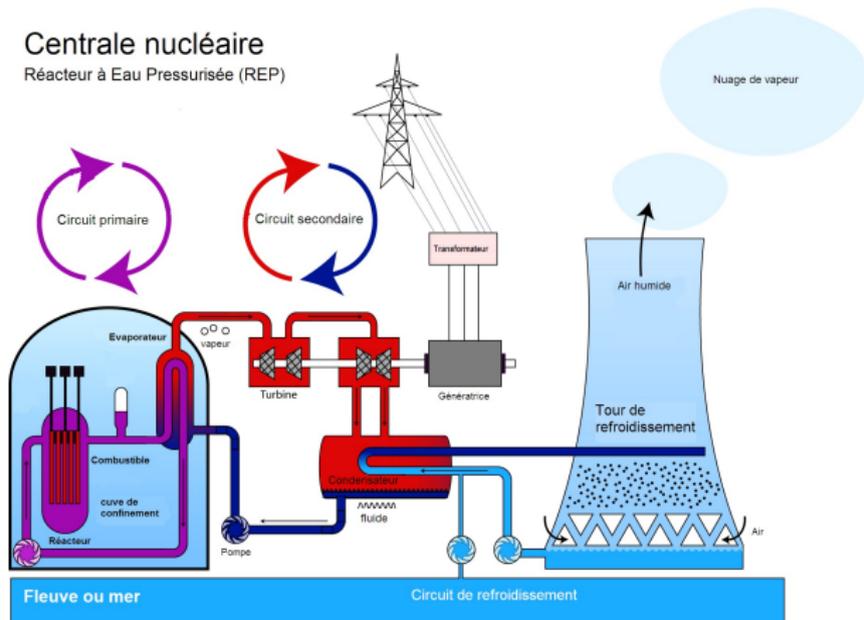
Application 2: Encrassement du G.V.

Application 3: Interaction fluide-structure : I.F.S

Conclusion

Le générateur de vapeur :G.V.

- ▶ Composant d'une centrale REP
- ▶ Echangeur de chaleur
- ▶ En aval du coeur et en amont des turbines



- ✓ **Fonction économique:** fournir de la vapeur sèche à l'admission aux turbines (taux d'humidité $\leq 0.10\%$)
- ✓ **Fonction de sûreté:** évacuer la puissance résiduelle + barrière de confinement du fluide primaire

Le GV



Plan

Une brève visite du G.V...

Son rôle : assurer le refroidissement du fluide primaire

Le concept économiseur

Modéliser un système de grande taille

Qu'appelle-t'on code COMPOSANT ?

Application 1: particularité des écoulements à travers un faisceau

Application 2: Encrassement du G.V.

Application 3: Interaction fluide-structure : I.F.S

Conclusion

Le concept économiseur

Objectif : gain en Pression sortie vapeur

Technologie: placer l'échange sous-saturé en intégralité en B.F.

- ▶ cloison économiseur
- ▶ partitionner le down-comer

Description :

- ▶ hauteur: 20 m
- ▶ masse: 500 t
- ▶ 3000 à 5000 tubes de Φ 20 mm
- ▶ puissance: 1000 MW
- ▶ surface d'échange: 7000 m²
- ▶ flux de chaleur: 150 kW/m²
- ▶ débit primaire : 6 m³/s, 155 bars, 350°C
- ▶ pression: 70 bars

Plan

Une brève visite du G.V...

Modéliser un système de grande taille

Les 3 échelles d'analyse

Qu'appelle-t'on code COMPOSANT ?

Application 1: particularité des écoulements à travers un faisceau

Application 2: Encrassement du G.V.

Application 3: Interaction fluide-structure : I.F.S

Conclusion

Modéliser un système de grande taille

Pourquoi ?

- ↗ accroître les marges vis à vis des modes de dégradation
- ↘ améliorer les performances

Comment ?

RARES mesures sur sites, pb de SIMILITUDES des maquettes, recours à la SIMULATION NUMERIQUE

- ✓ Géométries complexes: milieux macro-poreux fortement anisotropes et périodiques (ouf !)
- ✓ Ecoulements diphasiques (avec changement de phase) et turbulents

*Impossibilité de simuler tous les détails des écoulements: on remonte à l'échelle raisonnablement accessible au calcul, la dynamique de l'écoulement dans un **sous canal***

- ▶ Globale 1D: bilans, transitoires (ANETH)
- ▶ **Semi-locale** 3D: analyse vibratoire, encrassement, optimisation du fonctionnement (GENEPI, THYC)
- ▶ **Locale** 3D: conception, études de sûreté (Neptune CFD)



Plan

Une brève visite du G.V...

Modéliser un système de grande taille

Qu'appelle-t'on code COMPOSANT ?

Les équations semi-locales ou comprendre l'homogénéisation

Les fermetures

Les limites du modèle poreux...

Application 1: particularité des écoulements à travers un faisceau

Application 2: Encrassement du G.V.

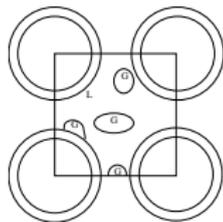
Application 3: Interaction fluide-structure : I.F.S

Conclusion

Les équations semi-locales ou comprendre l'homogénéisation

La base: les équations de Navier-Stokes

On moyenne d'abord statistiquement $x = \bar{x} + \acute{x}$, puis en volume $\langle x \rangle$, d'où le concept de porosité $\beta = \frac{\Omega_f}{\Omega}$



Hypothèses simplificatrices

- ▶ les propriétés des fluides varient peu à l'échelle du volume d'homogénéisation
- ▶ le milieu est spatialement ordonné

Et puis ...

on considère le **mélange** plutôt que chacune des phases, on "évacue" l'ensemble des termes d'échange.

FORMULAIRE

taux de vide α

$$\alpha\rho_g = x\rho$$

$$V_r = V_g - V_l$$

$$\rho = \alpha\rho_g + (1 - \alpha)\rho_l$$

$$G = \alpha\rho_g V_g + (1 - \alpha)\rho_l V_l$$

$$J = \alpha V_g + (1 - \alpha)V_l$$

$$\rho H = \alpha\rho_g H_g + (1 - \alpha)\rho_l H_l$$

$$x = \frac{H - H_l^{sat}}{\mathcal{L}}$$

$$\text{qualité} = \frac{\alpha\rho_g V_g}{\rho V}$$

ce qui donne ...

L'approche GENEPI:

- 1 EDP pour la température primaire
 - 2 fermetures algébriques
 $T_G = T_{sat}$ et V_r
 - 3 EDP pour: masse mélange, QDM mélange, enthalpie mélange
- et $P_G = P_L = P$

LES EQUATIONS SEMI-LOCALES

Température Primaire:

$$\frac{\partial \rho_P T_P}{\partial t} + \text{div}(\rho_P \vec{V}_P T_P) = -\frac{\gamma_0}{\beta_{P_0}} \frac{h_{eq}}{C_P} (T_P - T_W)$$

Masse:

$$\beta \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} \beta \rho \vec{V} = 0$$

Enthalpie:

$$\beta \rho \frac{\partial H}{\partial t} + \beta (\vec{G} \cdot \overrightarrow{\text{grad}} H) - \text{div}(\beta \chi_T \overrightarrow{\text{grad}} H) = \\ h_{eq}(T_P - T_W) - \text{div}(\beta x(1-x) \rho \mathcal{L} \vec{V}_R)$$

QDM:

$$\beta \frac{\partial \vec{G}}{\partial t} + \overrightarrow{\text{div}}(\beta \vec{G} \otimes \vec{V}) - \overrightarrow{\text{div}}(\beta \mu_T (\overline{\overline{\text{grad}}} \vec{V} + \overline{\overline{\text{grad}}}^T \vec{V})) \\ + \beta \overrightarrow{\text{grad}} P = \beta \rho \vec{g} - \beta \vec{R}_S - \overrightarrow{\text{div}}(\beta x(1-x) \rho \vec{V}_R \otimes \vec{V}_R)$$

Plan

Une brève visite du G.V...

Modéliser un système de grande taille

Qu'appelle-t'on code COMPOSANT ?

Les équations semi-locales ou comprendre l'homogénéisation

Les fermetures

Les limites du modèle poreux...

Application 1: particularité des écoulements à travers un faisceau

Application 2: Encrassement du G.V.

Application 3: Interaction fluide-structure : I.F.S

Conclusion

Les fermetures

- ▶ frottement fluide-solide: le concept de **multiplicateur diphasique** de Chisholm
- ▶ échange thermique : parcourir la courbe de Nukiyama (**convection**, **ébullition**, **surchauffe**)
- ▶ déséquilibre cinématique: le célèbre **Drift Flux** !

Frottement

En homogénéisant, on a perdu le détail de l'écoulement et donc le gradient de vitesse et les variations de pression au voisinage des parois

Il faut réinjecter cette information sous la forme de modèles

Le terme de frottement est la somme de 2 contributions:

- ◇ Réparti sur le faisceau tubulaire: $\vec{R}_S = -\overline{\Lambda}_R \vec{G}$
- ◇ Singulier à la traversée des obstacles plans: $\vec{R}_S = -\frac{A_S}{\Omega} \overline{\Lambda}_S \vec{G}$
les obstacles (plaques entretoises, barres anti-vibratoires) sont considérés comme des plaques épaisses : convergent + divergent placés en série; la bible d'Idel'cik + manip dédiées

Frottement Réparti

On empile les effets:

$$f = f_{1\phi} \times \Phi \times \xi$$

- ▶ frottement isotherme liquide: Blasius $f = A Re^{-B}$
- ▶ multiplicateur diphasique de Chisholm:

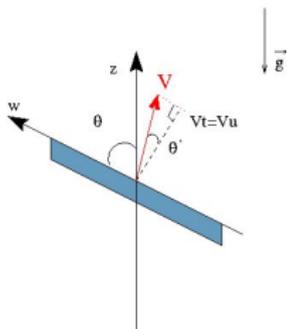
$$\frac{\Delta P}{\Delta P_{lo}} = \Phi_{lo}^2$$

$$\Phi_{lo}^2 = 1 + (\Gamma^2 - 1) \left[B(x_d(1 - x_d))^{\frac{2-b}{2}} + x_d^{2-b} \right]$$

$$\Gamma^2 = \left[\frac{\mu_g}{\mu_l} \right]^b \frac{\rho_l}{\rho_g}$$

- ▶ obliquité du faisceau: ξ
en monophasique $\xi(\theta') = 1.81 - 1.36\cos(\theta') + 0.55\cos^2(\theta')$
(Idel'cik)

Mise en oeuvre 3D : tenseur diagonal dans le repère local (u, v, w) des tubes, avec interpolation Ligne-Quinconce pour le transverse.



$$\overline{\overline{\Lambda}}_R = \begin{bmatrix} \frac{f_u}{2P} \|V_u\| \Phi_u \xi(\theta') & 0 & 0 \\ 0 & \frac{f_v}{2P} \|V_v\| \Phi_v \xi(\theta') & 0 \\ 0 & 0 & \frac{f_w}{2D_H} \|V_w\| \Phi_w \end{bmatrix}$$

Tables expérimentales avec en entrée la vitesse massique, le taux de vide, ou la qualité et la pression

Echange thermique

Flux échangé $q = h_{eq}(T_p - T_w) = h(T_w - T_s)$

$$\frac{1}{h_{eq}} = \frac{D_e}{D_i} \frac{1}{h_p} + \frac{D_e}{2\lambda_m} \ln \frac{D_e}{D_i} + R_e$$

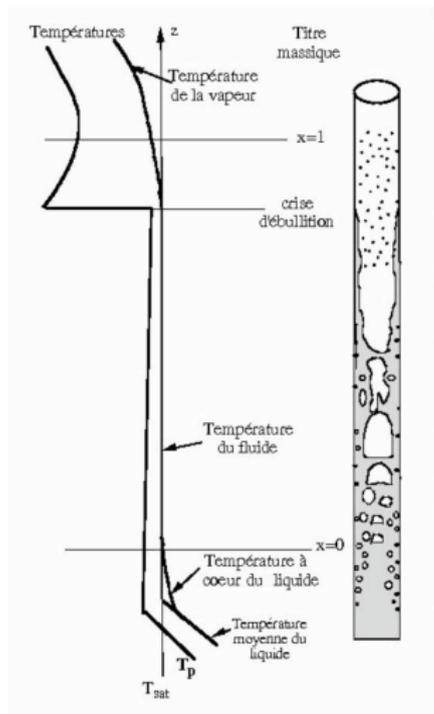
Re: Résistance d'encrassement $\approx 3 \cdot 10^{-5}$

- ◇ Convection forcée liquide : coefficients d'échange // et \perp et loi de composition oblique (Butterworth, $a = 3$).

$$q = h_{cf}(T_w - T) \text{ avec } h_{cf} = C \frac{\lambda_l}{D_H} Re^m Pr^n$$

$$X^a = (X^{//})^a \sin^2 \theta + (X^{\perp})^a \cos^2 \theta$$

Echange thermique



- ◇ Transition convection - ébullition : méthodes du flux maximal ($T_w = \min(T_{w_{cf}}, T_{w_{en}})$) ou de superposition (facteurs F d'amplification de la convection et S d'atténuation de l'ébullition d'après la théorie de Chen)
- ◇ Ebullition locale sous-saturée : modèles de titre de détachement des bulles x_d (Saha) pour modéliser le déséquilibre thermodynamique entre les phases.
- ◇ Ebullition nucléée:
 $q = h_{en}(T_w - T)$ avec
 $h_{en} = A(T_w - T_{sat})^b$
 - ✓ Adimensionnelles : corrélation de Roshenow, Forster-Zuber
 - ✓ Fréon : corrélations Mercedes
 - ✓ Eau : corrélations Jens&Lottes

Echange thermique

- ◇ Echange post-critique: calcul du **flux critique** (Groeneveld, Katto, Relap...), et selon le cas, modèle d'ébullition en film ou échange convectif gazeux

et ainsi l'on a parcouru la courbe de Nukiyama:

Déséquilibre cinématique

On se rappelle qu'en 1D: $\alpha = \frac{1}{1 + \frac{1-x}{x} \frac{\rho_g v_g}{\rho_l v_l}}$ donc l'écart de vitesse joue directement sur le taux de vide.

∃ 2 approches:

◇ Glissement scalaire, $\vec{V}_g = S \vec{V}_l$

ex: corrélation Armand-Massena $S = \frac{6+x_d \frac{\rho_l}{\rho_g}}{5+x_d}$

N.B.: pas de vitesse limite gaz dans le modèle de glissement si $V_l = 0$ alors $V_g = 0$!!

◇ Modèle de dérive - Formulation de Zuber-Findlay:

$$\vec{V}_g = \overline{C_0} \vec{j} + \vec{V}_{gj}$$

Principe: superposer

✓ les effets de profils: paramètre de distribution $C_0 = \frac{\langle \alpha_j \rangle}{\langle \alpha \rangle \langle j \rangle}$

✓ à la dynamique propre aux inclusions: équilibre

flottabilité-traînée $V_{gj} = -\sqrt{2} \left[\frac{\sigma(\rho_l - \rho_g)g}{\rho_l} \right]^{0.25} \frac{(1-\alpha)^{0.5}}{1+\alpha}$ (Lellouche Zolotar)

Drift flux: quel écart de vitesse ?

$v_r = v_g - v_l$ écart de vitesse au sens local

$v_{gj} = v_g - j = (1 - \alpha)v_r$ drift local

là où ça se complique: on introduit la moyenne "pondérée":

$$\langle\langle v_g \rangle\rangle = \left\langle \frac{\alpha v_g}{\alpha} \right\rangle$$

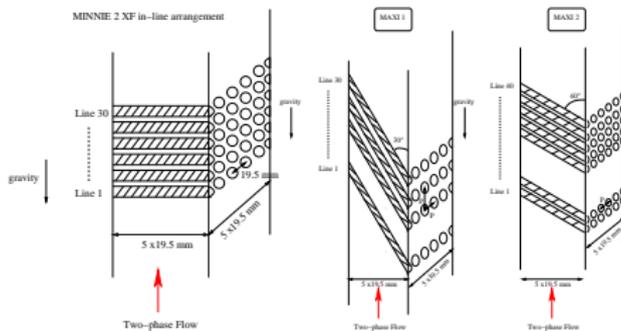
$$\langle\langle v_l \rangle\rangle = \left\langle \frac{(1 - \alpha)v_l}{1 - \alpha} \right\rangle$$

$V_{gj} = \langle\langle v_{gj} \rangle\rangle$ moyenne pondérée du drift local

Donc V_r n'a rien à voir avec v_r ...

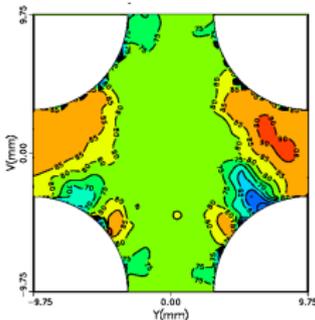
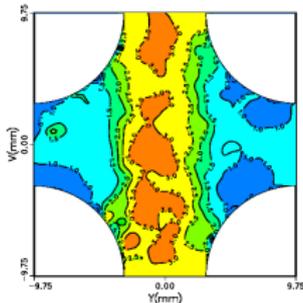
$$V_r = \frac{[(C_0 - 1)V + V_{gj}][1 - x + x(\frac{\rho_l}{\rho_g})]}{\left[1 + x(1 - C_0)(\frac{\rho_l}{\rho_g} - 1)\right] [1 - x]}$$

le Drift flux en pratique:



↔ Analyses locales des champs de vitesses et de taux de vide à l'intérieur d'un sous-canal pour diverses configurations

Exemple: écoulement vertical ascendant double-phase en Fréon 114 ($\alpha = 80\%$, $G = 600 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$) à travers un faisceau oblique (60 degrés)



$$\Rightarrow C_0^{exp}(\alpha, \theta)$$

le Drift flux en pratique: Mise en oeuvre 3D:

Proposition: paramètre de distribution anisotrope prenant en compte l'incidence de l'écoulement sur le faisceau, en plus des caractéristiques physiques de l'écoulement (α et G)

$$\overline{\overline{C_0}} = \begin{pmatrix} C_{0\perp}(\theta') & 0 & 0 \\ 0 & C_{0\perp}(\theta') & 0 \\ 0 & 0 & C_{0//}(\theta') \end{pmatrix}$$

Oui mais...le drift flux a ses limites

- ▶ singularité mathématique aux forts taux de vide (du moment qu'on impose: $\lim_{\alpha \rightarrow 1} V_r = 0$ pour un écoulement purement gazeux)
- ▶ l'écart de vitesse est fortement sensible à une faible variation du C_0 aux vitesses élevées:

$$V_r = \frac{[(C_0 - 1)V + V_{gJ}][1 - x + x(\frac{\rho_l}{\rho_g})]}{\left[1 + x(1 - C_0)(\frac{\rho_l}{\rho_g} - 1)\right] [1 - x]}$$

- ▶ \exists une variété importante de topologies d'écoulements que le modèle ignore (taille des inclusions, effet du confinement...).

Plan

Une brève visite du G.V...

Modéliser un système de grande taille

Qu'appelle-t'on code COMPOSANT ?

Les équations semi-locales ou comprendre l'homogénéisation

Les fermetures

Les limites du modèle poreux...

Application 1: particularité des écoulements à travers un faisceau

Application 2: Encrassement du G.V.

Application 3: Interaction fluide-structure : I.F.S

Conclusion

Les limites de l'approche poreuse:

- ▶ prédiction des champs de vitesse dans la zone cintrée (chargement vibratoire)
- ▶ les singularités (B.A.V., ru d'eau), les phénomènes locaux (obstruction des trous quadrifoliés)

Plan

Une brève visite du G.V...

Modéliser un système de grande taille

Qu'appelle-t'on code COMPOSANT ?

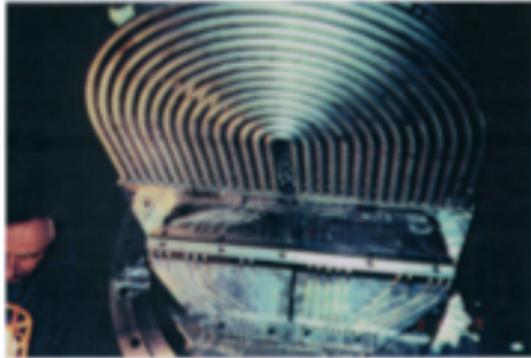
Application 1: particularité des écoulements à travers un faisceau
Écoulements dans la zone cintrée du G.V.

Application 2: Encrassement du G.V.

Application 3: Interaction fluide-structure : I.F.S

Conclusion

Objectif : Etudes à fort taux de vide du déséquilibre cinématique et du frottement diphasique



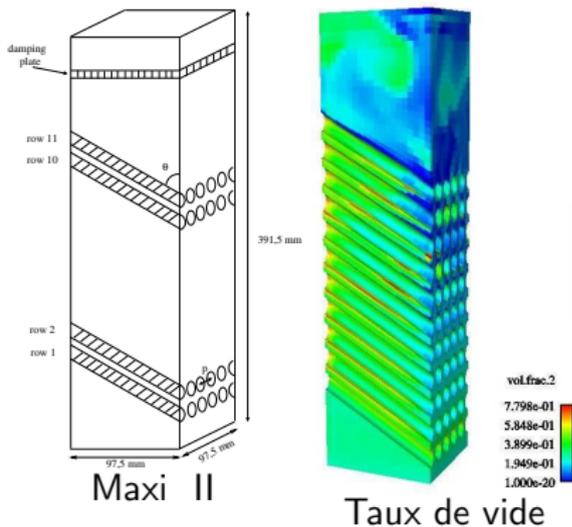
Comment améliorer les lois de fermeture du modèle bi-fluide ?

Manque de données expérimentales

Le pari : utiliser des calculs locaux (*Neptune CFD*)

Comparaison simulation écoulement diphasique 3D et expérience

- ▶ **Expérience** Maxi II : 149 points dans une cellule centrale d'un faisceau de tubes droits inclinés à 60°
- ▶ Simulation avec *Neptune-CFD* : Résolution des 6 équations de conservation avec le modèle de turbulence $k-\epsilon$ pour la phase liquide et le modèle de Tchen pour la phase gazeuse



- Simulation réalisée avec les modèles par défaut de *Neptune-CFD* pour un taux de vide de 20%
- Comparaison taux de vide simulé/mesuré → bonne
- Comparaison vitesses gazeuses simulées/mesurées → peu satisfaisante près des parois

Poursuite ...

- ▶ Raffinement du maillage près des parois
- ▶ Simulation avec l'équation du transport de l'aire interfaciale
- ▶ Modèles mono disperse avec fonction de distribution du diamètre des inclusions gazeuses

Conclusion

Ségrégation des phases par le faisceau oblique et selon la taille des inclusions

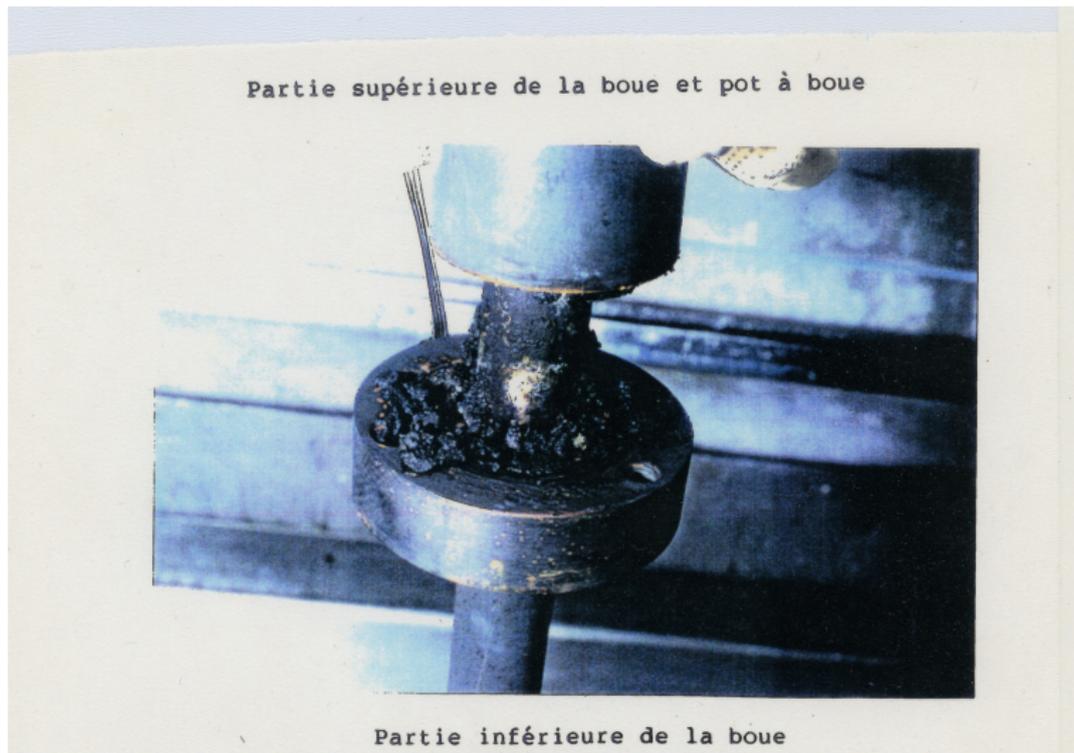
↔ le code composant doit évoluer vers un Modèle bi-fluide (multi-champs ? polydispersé ? ...)

Le SAUT:

- ▶ Physique de l'interface Liq/Gaz
- ▶ Développement de l'instrumentation (a minima V_{gaz} et V_{liq})

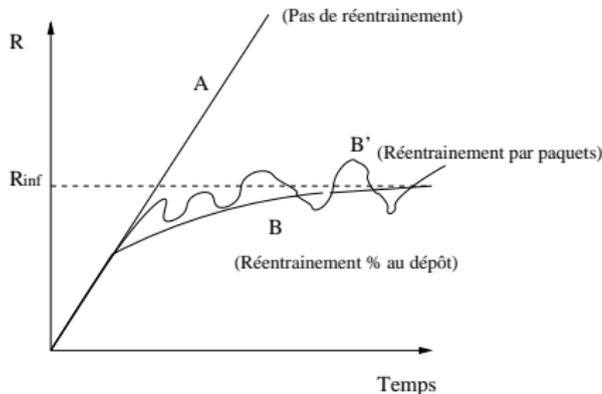
Application 2: Encrassement du G.V.

Définition : Dépôt de matériaux ou substances non désirés sur les surfaces d'échanges



Modèles de dépôt et réentraînement

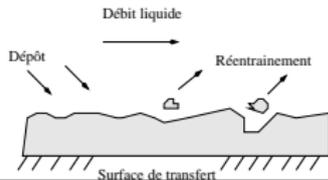
$$\frac{dm_d}{dt} = \Phi_d - \Phi_r$$



- ▶ Encrassement particulaire ✓
- ▶ Entartrage
- ▶ Corrosion
- ▶ Encrassement biologique
- ▶ Encrassement par réaction chimique

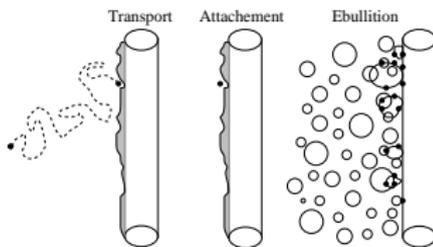
Zones d'encrassement

Plaque à tubes



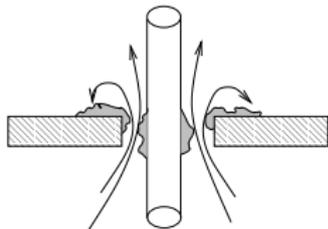
Sédimentation, Collage, Réentraînement

Faisceau



Transport, Collage, Attachement, Dépôt par ébullition (spot, ring)

Plaque entretoise



Colmatage, veine contractée

Modélisation du processus de dépôt

Etape 1 : Calcul de la thermohydraulique de la phase porteuse (éq. de N.S + lois de fermeture)

Etape 2 : Résolution d'une équation de transport des particules en suspension ($1 \mu m \leq d_p \leq 10 \mu m$)
du coeur de l'écoulement au voisinage de la paroi.

 C_p est l'inconnue.

$$\beta \frac{\partial C_p}{\partial t} + \frac{\partial(\beta C_p \vec{V}_{pi})}{\partial x_i} = \beta S_p + \frac{\partial}{\partial x_i} (\beta D_{tp} \frac{\partial C_p}{\partial x_i})$$

Etape 3 : Appel aux modèles pour $\vec{V}_p = \vec{V}_L + \vec{V}_R$, D_{tp} et S_p

- ▶ Pour la vitesse particulaire $\vec{V}_p = \vec{V}_L + \vec{V}_R$

⇒ Modèle de sédimentation

- ▶ Pour la diffusion turbulente particulaire D_{tp}

⇒ Modélisation par un processus de Fick

- ▶ Pour le terme source/puits $S_p = S_d - S_r$

$$S_d = \tau\gamma_0 K C_p \text{ avec } K = \left(\frac{1}{K_t} + \frac{1}{K_a}\right)^{-1} + K_{bo}$$

$$S_r = \tau\gamma_0 E w_d \Phi(w_d)$$

Application 3: Interaction fluide-structure : I.F.S

- ▶ La modélisation actuelle se fait via des calculs chaînés

CALCUL TH
 α, V_N, ρ, H, P



CALCUL MECANIQUE
. Sollicitations sur les structures
. Critère d'instabilité

- ▶ Les codes industriels de mécanique sont basés sur le modèle homogène ($V_g = V_l = V$) non adéquat

Objectif : Compréhension physique des vibrations sous écoulement diphasique.

- ▶ Maquette analytique
eau/air
- ▶ P_{atm} , T_{amb}
- ▶ Tube transverse équipé d'un
Capteur de Force
- ▶ Bi-sonde Optique

- Effet du régime d'écoulement
- Influence d'un terme s'apparentant aux fluctuations de taux de vide

Poursuite ...

- ▶ Travail sur l'instabilité fluide-élastique
- ▶ Etude en configuration faisceau

Conclusion

Les besoins actuels sur les G.V. se concentrent sur la zone du chignon + interstices tubes/P.E. :

- ✓ Manip. analytiques → **Modèles locaux**
- ✓ Manip. intégrale/semi intégrale → **Modèles poreux**
- ✓ La simulation numérique offre l'opportunité d'utiliser plusieurs échelles et plusieurs disciplines pour un problème donné → Nécessité **des couplages**